

**POLITECNICO DI MILANO**  
**Scuola di Ingegneria dei Processi Industriali**  
**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Nucleare**  
**Dipartimento di Energia**



**Studio ed applicazioni di dosimetri TLD di LiF per misure in fasci termici ed  
epitermici al reattore LVR-15**

Relatore: Fabrizio Campi  
Correlatore esterno: Grazia Gambarini

Tesi di Laurea di:  
Luca Barcaglioni  
Matr. Nr. 787184

Anno Accademico 2013-2014

# INDICE

<b>ABSTRACT (ITALIANO)</b> .....	<b>9</b>
<b>ABSTRACT (INGLESE)</b> .....	<b>12</b>
<b>1. Dosimetria per fasci di neutroni da reattore nucleare da ricerca</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Dosimetri a termoluminescenza (TL)</b> .....	<b>18</b>
2.1 Glow Curve.....	19
2.2 Dosimetri o TL di Lif.....	20
2.3 Procedure sperimentali.....	21
2.3.1 Annealing.....	22
2.3.2 Stabilizzazione della risposta di TLD nuovi.....	23
2.3.3 Metodo di analisi dei TLD .....	23
2.3.4 Calibrazione con fotoni.....	25
2.4 Problematiche in alti flussi di neutroni.....	29
2.5 Metodo di separazione di dose gamma e fluensa termica.....	30
<b>3. Misure per attivazione</b> .....	<b>34</b>
3.1 Configurazione irraggiamenti.....	34
3.2 Metodo di analisi.....	37
3.3 Risultati.....	38
<b>4. Misure al reattore LVR-15 con TLD di LiF</b> .....	<b>40</b>
4.1 Irraggiamenti in aria.....	40
4.2 Irraggiamenti in fantoccio.....	42
4.3 Risultati delle misure in aria.....	43
4.3.1 TLD-700.....	43
4.3.2 TLD-100.....	47
4.4 Risultati delle misure in fantoccio.....	53

4.5 TLD-600.....	55
4.6 Calibrazione ai neutroni termici dei TLD-700.....	57
<b>5. Dosimetri a gel di Fricke e TLD.....</b>	<b>61</b>
5.1 Dosimetri a gel di Fricke.....	61
5.2 configurazioni degli irraggiamenti in aria.....	63
5.3 Risultati.....	64
5.3.1 Risultati delle misure in aria.....	64
5.3.2 Risultati delle misure in fantoccio.....	67
<b>6. Dosimetri di alanina e TLD.....</b>	<b>70</b>
6.1 Configurazioni.....	71
6.1.1 Misure in fantoccio.....	71
6.1.2 Misure in aria.....	72
6.2 Risultati.....	74
6.2.1 TLD-700.....	74
6.2.2 TLD-100.....	79
<b>Conclusioni.....</b>	<b>83</b>
<b>Appendice.....</b>	<b>85</b>
I. La BNCT.....	85
II. Reattore da ricerca LVR-15 di Řež (Praga).....	86
<b>Bibliografia.....</b>	<b>88</b>

# LISTA DELLE FIGURE

1	Schema del processo di termoluminescenza.....	19
2	Esempio di GLow Curve (GC) di TLD-100 irraggiato in campo gamma.....	20
3	Esempio di GLow Curve (GC) di TL-100 irraggiato in campo misto.....	20
4	TLD in contenitore di Alluminio anodizzato.....	22
5	Strumento della Bicron (Harshaw modello TLD 3500).....	24
6	Esempio di GC di un TLD-700 con corrispondente rampa termica.....	25
7	Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-700 in funzione della dose gamma somministrata relativi alla prima calibrazione con fotoni.....	27
8	Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-700 in funzione della dose gamma somministrata relativi alla seconda calibrazione con fotoni.....	27
9	Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-100 in funzione della dose gamma somministrata durante la calibrazione con fotoni.....	28
10	Coefficienti di sensibilità medi per i TLD-700 ricavati dalla doppia calibrazione con fotoni.....	29
11	Separazione dei contributi con il metodo proposto.....	32
12	Foglietti senza Cadmio.....	35
13	Foglietti schermati con Cadmio.....	35
14	Inserimento supporto con foglietti in fantoccio.....	36
15	Strumentazione di analisi dei foglietti.....	37
16	Rateo di fluena in funzione delle profondità in fantoccio di polietilene.....	38
17	Profilo trasversale di rateo di fluena in supporto SOTTILE di polistirene.....	39
18	Preparazione della configurazione SOTTILE per TLD-700.....	41
19	Inserimento TLD in supporto per fantoccio.....	42
20	Fantoccio con dosimetri TLD pronto all'irraggiamento.....	43
21	Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dei TLD-700 dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT, nella configurazione supporto SOTTILE.....	44
22	Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	45

23	Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	46
24	Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	47
25	Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	49
26	Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE (l'errore dei valori ottenuti dai TLD-700 è compreso nelle dimensioni del punto).....	50
27	Separazione dei contributi da un TLD-100 irraggiato in HK1.....	50
28	Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	52
29	Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	53
30	Andamento medio del rateo di dose gamma in funzione della profondità in fantoccio da TLD-700.....	54
31	Andamento medio della fluenza in unità arbitrarie in funzione della profondità in fantoccio da TLD-700.....	55
32	TLD-600 nell'apposito supporto prima dell'irraggiamento nella HK1.....	56
33	Esempio di GC per un TLD-600, irraggiato nella HK1.....	57
34	Calibrazione TLD-700 in supporto SOTTILE utilizzando come parametro h2 Řež.....	59
35	Calibrazione TLD-700 in supporto SOTTILE utilizzando come parametro h2 neutroni.....	59
36	Calibrazione TLD-700 in FANTOCCIO utilizzando come parametro h2 neutroni.....	60
37	TLD-700 inseriti in gel non dosimetrico.....	64
38	Profili di rateo di dose gamma in colonna BNCT ottenuti con TLD-700 e gel di Fricke.....	65
39	Profilo di fluenza termica in colonna BNCT valutata con TLD-700 e gel di Fricke.....	66
40	Rateo di dose gamma misurato con TLD-700 in supporto SOTTILE e finto gel, in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT.....	66
41	Fluenza termica (u.a.) misurato con TLD-700 in supporto SOTTILE e finto gel, in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT.....	67

42	Andamento del rateo di dose gamma in funzione della profondità in FANTOCIO misurata con TLD-700 e gel di Fricke.....	68
43	Calibrazioni ai neutroni dei dosimetri a gel di Fricke utilizzando TLD-700 e foglietti di attivazione.....	69
44	Inserimento alanina in supporto.....	71
45	Supporto ALANINA visto lateralmente.....	72
46	TLD inseriti in supporto ALANINA pronto per l'irraggiamento.....	73
47	Preparazione supporto SOTTILE con alanina.....	73
48	Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	75
49	Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	76
50	Profilo della fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	77
51	Profilo della fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	78
52	Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 e TLD-700 nel supporto ALANINA.....	80
53	Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	82
54	Profilo della fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA e SOTTILE.....	82
55	Diverse colonne al reattore LVR-15 di Řež.....	86
56	Fascio epitermico al reattore LVR-15 di Řež.....	87
57	Spettro misurato di neutroni della colonna epitermica del reattore LVR-15 di Řež.....	87

# LISTA DELLE TABELLE

1	Classificazione dei neutroni secondo le loro energie.....	15
2	Composizione delle diverse tipologie di TLD di LiF utilizzati nelle misure.....	21
3	Valori della media delle altezze dei picchi dosimetrici in unità arbitrarie dei TLD-700 in funzione della dose somministrata.....	26
4	Valori della media delle altezze dei picchi dosimetrici in unità arbitrarie dei TLD-100 in funzione della dose somministrata.....	27
5	Ratei di fluena in fantoccio di polietilene.....	38
6	Ratei di fluena in supporto SOTTILE di polistirene.....	39
7	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	43
8	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	44
9	Rateo di fluena termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	45
10	Rateo di fluena termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE.....	46
11	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	48
12	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 Per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	48
13	Fluena termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	51
14	Fluena termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE.....	52
15	Rateo di dose gamma ottenuta da TLD-700, in funzione della profondità in fantoccio.....	53
16	Fluena termica in unità arbitrarie ottenuta da TLD-700, in funzione della profondità in fantoccio.....	54
17	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA.....	74

18	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA.....	75
19	Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA.....	76
20	Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA.....	77
21	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA.....	80
22	Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA.....	80
23	Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA.....	81
24	Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA.....	81



## ABSTRACT (ITALIANO)

L'obiettivo di questo lavoro è stato lo studio di un metodo per separare e valutare i diversi contributi di dose in un campo misto di fotoni e neutroni epitermici/termici con ratei di fluensa molto elevati; in particolare il campo studiato è quello prodotto da un fascio di neutroni da reattore nucleare da ricerca.

La campagna di misure dosimetriche è stata effettuata presso il reattore LVR-15 del *Research Centre Řež* (Praga-Repubblica Ceca) e ha riguardato i fasci di neutroni di due colonne di tale reattore, per i quali era stata richiesta una caratterizzazione.

Uno dei fasci è quello della colonna epitermica progettata per effettuare trattamenti di Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), moderato da 2 cm di polietilene. L'altro è il fascio termico della colonna HK1, recentemente destinata a misure di Neutronography.

Le misure in una colonna di neutroni epitermici o termici sono particolarmente complesse a causa sia della molteplicità delle interazioni dei neutroni nei mezzi attraversati, sia dell'alto rateo di fluensa dei neutroni in fasci da reattore. A seconda dell'energia dei neutroni vi sono diversi meccanismi di interazione probabili; in particolare i neutroni termici hanno elevata sezione d'urto per svariati isotopi che possono essere contenuti nei materiali attraversati, e quindi per la caratterizzazione di un fascio è importante determinare la distribuzione spaziale del rateo di fluensa. I parametri di caratterizzazione dei fasci che si sono studiati in questo lavoro sono il rateo di dose gamma (che è dovuta al fondo del reattore e alle interazioni nei neutroni con i materiali di collimazione e moderazione) e il rateo di fluensa dei neutroni termici.

Per queste misure sono stati utilizzati rivelatori a termoluminescenza (TLD) di fluoruro di litio drogati con magnesio e titanio (LiF:Mg,Ti), sfruttando la diversa sezione d'urto per neutroni termici degli isotopi  $^7\text{Li}$  e  $^6\text{Li}$ . Infatti l'interazione dei neutroni termici con il  $^7\text{Li}$  è una reazione  $(n,\gamma)$  e i fotoni generati in questa reazione non rilasciano una energia misurabile nel dosimetro stesso. Invece con il  $^6\text{Li}$  i neutroni termici provocano, con elevata sezione d'urto, una reazione  $(n,\alpha)$  e le particelle cariche generate, particelle  $\alpha$  e T, rilasciano tutta l'energia nel dosimetro. Quindi la sensibilità dei dosimetri di LiF ai neutroni termici dipende dalla quantità di  $^6\text{LiF}$  contenuta. La risposta di tali dosimetri è quindi dovuta alla dose gamma assorbita, che è la dose caratteristica della posizione in cui è posizionato il dosimetro e all'energia assorbita a causa delle particelle cariche generate dalla reazione dei neutroni termici con il  $^6\text{Li}$  che è legata alla fluensa di neutroni termici nella posizione in

cui è posto il dosimetro. I dosimetri utilizzati sono i TLD-700 (che contengono 0.01% di  $^6\text{LiF}$ ) e i TLD-100 (LiF naturale con 7.5% di  $^6\text{LiF}$ ).

Relativamente ai TLD-700, è stato implementato un metodo per ricavare la dose gamma e la fluenza di neutroni termici, in base alle caratteristiche della risposta di tali dosimetri, in particolare in base alle altezze dei due picchi dosimetrici il cui rapporto assume un valore diverso rispetto ai fotoni e ai neutroni termici. Non è stato utilizzato un valore medio di calibrazione dei dosimetri ma per ogni dosimetro è stata valutata una sua personale sensibilità. Inoltre prima di ogni irraggiamento è stato eseguito con cura un procedimento di rigenerazione dei dosimetri (annealing) avendo la massima cura nel mantenere riproducibili le condizioni termiche sia in fase di riscaldamento che raffreddamento dei dosimetri stessi. Tenendo conto inoltre del fatto che per gli intervalli di dose coinvolti si possono avere effetti di sotto-linearità che può avere entità diverse per i due picchi dosimetrici delle Glow Curve, si è avuto cura di effettuare la calibrazione di ogni dosimetro nell'intorno della dose ricevuta nelle misure al reattore.

Il contributo alla dose dovuto alla componente veloce del fascio che è consistente solo per fasci epitermici, non è rivelabile con i TLD utilizzati in quanto l'effetto prodotto dai neutroni veloci è dovuto a scattering elastici ovvero ai nuclei di rinculo e risulta trascurabile in questi materiali che non sono idrogenati. Questa caratteristica è vantaggiosa perché facilita la deduzione della dose gamma in questi campi misti n- $\gamma$  che risulta più complessa con altri dosimetri la cui risposta risente anche della componente veloce del fascio.

Per i TLD-100 è stata valutata la consistenza dei risultati ottenibili sfruttando diversi parametri come risposta dei dosimetri ed è stato dedotto che la scelta del parametro migliore è diversa a seconda del peso relativo della dose gamma e della fluenza termica del fascio, che sono notevolmente diverse nelle due colonne studiate.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati durante la stessa campagna di misure utilizzando dosimetri a gel di Fricke.

I dosimetri a gel di Fricke sono soluzioni acquose eventualmente addizionate con  $^{10}\text{B}$ , che ha sezione d'urto elevata per neutroni termici. Le dosi misurate nel caso di fasci epitermici sono dovute alla dose gamma e veloce nei dosimetri standard. In quelli addizionati con Boro a queste dosi si aggiunge la dose dovuta alle particelle cariche prodotte dall'interazione con i neutroni termici con il  $^{10}\text{B}$ . Con i dosimetri a gel è quindi possibile determinare distribuzioni spaziali di dose gamma e fluenza termica dopo aver sottratto il contributo dei neutroni veloci. Quest'ultimo è determinabile in modo non semplice utilizzando dosimetri a gel standard e dosimetri analoghi fatti con acqua pesante. Le

separazioni vengono separate mediante opportune metodologie e applicando appropriati algoritmi. Questi dosimetri inoltre hanno una risposta che varia nel tempo e che quindi dipende dal tempo intercorso tra calibrazione e utilizzo. Inoltre la loro precisione dipende da vari parametri quali la correttezza delle pesate dei composti chimici utilizzati e la storia termica dei dosimetri durante la preparazione. A causa di queste incertezze è quindi opportuno eseguire misure anche con un diverso dosimetro per poter effettuare un confronto e apportare eventuali correzioni. I TLD sono un valido strumento per raggiungere tale finalità. Infatti essi hanno il vantaggio di poter essere continuamente rigenerati e riutilizzati e quindi sono calibrabili con notevole precisione. I TLD utilizzati in questo lavoro di ricerca sono stati calibrati alla radiazione gamma utilizzando i fotoni di una sorgente di  $^{60}\text{Co}$  di un'unità di radioterapia presso l'Istituto dei Tumori di Milano.

I risultati ottenuti con i TLD tramite il metodo proposto in questo lavoro di ricerca si sono rivelati consistenti rispetto ai risultati ottenuti con dosimetri a gel di Fricke dando così una dimostrazione dell'efficacia del metodo proposto basato sulla forma delle Glow Curve (GC) per separare i contributi dovuti alla radiazione gamma e alla fluenza di neutroni in un campo misto n- $\gamma$  tipico di fasci da reattore nucleare di ricerca come quello in cui si è svolta la campagna di misure presentata in questo lavoro.

Inoltre i risultati ottenuti con i TLD saranno utilizzati per un esperimento che coinvolge dosimetri di alanina anch'essi irraggiati durante la stessa campagna di misure e che però al momento sono ancora in fase di calibrazione. I dosimetri di alanina con e senza Boro permettono di dedurre la fluenza termica e una dose che comprende l'effetto della radiazione gamma e dei neutroni veloci. Utilizzando i risultati di dose gamma ottenuti con i TLD sarà possibile ricavare dai risultati dei dosimetri di alanina informazioni sulla dose dovuta alla coda veloce del fascio.

## ABSTRACT (ENGLISH)

The objective of this work was the study of a method to separate and evaluate the different contributions of dose in a mixed field of photons and neutrons epithermal/thermal with very high neutron fluence rate; in particular, the field studied is that produced by a beam of neutrons from research nuclear reactor.

The campaign of dosimetric measurements were carried out at the LVR-15 reactor of the Research Centre Řež (Prague-Czech Republic). The measurements were focused on the neutron beams of two columns of the reactor, which was required for characterization.

One of the beams is that of the epithermal column designed for treatments of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), moderated by 2 cm of polyethylene. The other is the beam of the thermal column HK1, recently used for measures of Neutronography.

The measurements in a thermal or epithermal neutron column are particularly complex due to both the multiplicity of interactions of neutrons in the means through which both the high fluence rate of beam from reactor. Depending on the energy of the neutrons there are several probable mechanisms of interaction; in particular thermal neutrons have a high cross section for various isotopes that can be contained in the materials crossed, and then for the characterization of a beam is important to determine the spatial distribution of the fluence rate.

The characterization parameters of the beams that were studied in this work are the gamma dose rate (which is due to the bottom of the reactor and neutron interactions in materials with moderation and collimation) and the rate of thermal neutron fluence.

For these measures have been used thermoluminescence detectors (TLD) of lithium fluoride doped with magnesium and titanium (LiF:Mg,Ti), exploiting the different cross section for thermal neutrons isotopes  ${}^6\text{Li}$  and  ${}^7\text{Li}$ . In fact, the interaction of thermal neutrons with the  ${}^7\text{Li}$  reaction is a  $(n,\gamma)$  and photons generated in this reaction does not release a measurable energy in the dosimeter itself. But with the  ${}^6\text{Li}$  thermal neutrons cause, with high cross section, a reaction  $(n,\alpha)$  and charged particles release all the energy in the dosimeter. Therefore, the sensitivity of LiF dosimeters to thermal neutrons depends on the amount of  ${}^6\text{LiF}$  contained. The response of these dosimeters is due to the absorbed gamma dose and the absorbed energy due to the charged particles generated by the reaction of thermal neutrons with  ${}^6\text{Li}$ . The measured dose is characteristic of the position in which is placed the dosimeter in the radiation field.

The dosimeters used are the TLD-700 (containing 0.01% of  $^6\text{LiF}$ ) and TLD-100 (LiF natural with 7.5% of  $^6\text{LiF}$ ).

Relatively to the TLD-700, has been implemented a method to derive the gamma dose and the fluence of thermal neutrons, according to the characteristics of the response of these dosimeters, in particular by using the heights of the two peaks dosimetric whose ratio assumes a value other than compared to photons and thermal neutrons. It was used an average value of the calibration of dosimeters but for each dosimeter was assessed a personal sensitivity. In addition, before each irradiation was performed with care a regeneration process dosimeters (annealing), taking the utmost care in maintaining reproducible thermal conditions during both heating and cooling of the dosimeters themselves. Taking into account also the fact that for the ranges of dose may be involved in the effects of linearity that can have different entities for the two peaks of the dosimetric Glow Curve, care was taken to calibrate each dosimeter in the range of the dose received in the measurements to the reactor.

The contribution to the dose due to the fast component of the beam, which is consistent only for epithermal beams, is not detectable by the TLD used because the effect produced by fast neutrons is due to elastic scattering that is recoil of the nuclei and is negligible in these materials, which are not hydrogenated. This feature is advantageous because it facilitates the deduction of the gamma dose in these fields mixed n- $\gamma$  that is more complex than with other dosimeters whose response is also influenced by the fast component of the beam.

For the TLD-100 was evaluated the consistency of the results obtained using different parameters like response of dosimeters and it was concluded that the best choice of the parameter is different depending on the relative weight of the gamma dose and thermal fluence of the beam, which are markedly different in the two columns studied.

The results obtained were compared with those obtained during the same measurement campaign using Fricke gel dosimeters.

The Fricke gel dosimeters are aqueous solutions where appropriate with the addition of  $^{10}\text{B}$ , which has a high cross section for thermal neutrons. The doses measured in the case of the epithermal beams are due to the gamma dose and fast in the standard dosimeters. In those added with Boron at these doses should be added to the dose due to charged particles produced by the interaction with thermal neutrons with  $^{10}\text{B}$ . With gel dosimeters is then possible to determine spatial distributions of thermal fluence and dose range after subtracting the contribution of fast neutrons. The latter can be determined not simply by using a standard gel dosimeters and one dosimeter

made with heavy water instead of light water. The separations are separated by appropriate methodologies and applying appropriate algorithms. These dosimeters also have a response that varies over time and therefore depends on the time elapsed between calibration and use. Furthermore, their accuracy depends on various parameters such as the correctness of the weighing of the chemical compounds used and the thermal history of the dosimeters during preparation. Because of these uncertainties it is therefore appropriate to make measurements with a different dosimeter in order to make a comparison and make any necessary corrections. TLDs are a valuable tool for achieving that goal. In fact, they have the advantage of being able to be continuously regenerated and reused, and then can be calibrated with considerable precision. The TLD used in this research work have been calibrated to gamma radiation using photons with a source of  $^{60}\text{Co}$  radiotherapy unit at the National Cancer Institute of Milan.

The results obtained with the TLD using the method proposed in this research work have proved consistent compared to results obtained with dosimeters Fricke gel. This consistence of results gives a demonstration of the effectiveness of the proposed method based on the shape of Glow Curve (GC) to separate contributions due to gamma radiation and neutron fluence in a mixed n- $\gamma$  field typical of beams from research nuclear reactor as one in which there was the campaign of measurements presented in this work.

Moreover, the results obtained with the TLDs will be used for an experiment involving alanine dosimeters irradiated also during the same measurement campaign and that but for the moment are still in the calibration phase. The alanine dosimeters with and without boron allow to deduce the thermal fluence and dose that includes the effect of gamma radiation and fast neutrons. Using the results of gamma dose obtained with the TLD will be possible to derive from the results of alanine dosimeters information on the dose due to the fast tail of the beam.

# 1. DOSIMETRIA PER FASCI DI NEUTRONI DA REATTORE NUCLEARE DA RICERCA

Le misure in una colonna di neutroni epitermici o termici sono particolarmente complesse a causa sia della molteplicità delle interazioni dei neutroni nei mezzi attraversati, sia della dipendenza delle sezioni d'urto di reazione dall'energia dei neutroni, sia dell'elevato rateo di fluenza di neutroni in fasci da reattore da ricerca, dell'ordine di  $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , come riportato nell'appendice 2.

I neutroni sono classificati secondo la loro energia, come riportato nella tabella seguente:

NEUTRONI	ENERGIE
TERMICI	< 0.5 eV
EPITERMICI	0.5 eV – 10 KeV
VELOCI	10 KeV – 10 MeV
RELATIVISTICI	> 10 MeV

Tabella 1: Classificazione dei neutroni secondo le loro energie

Rigorosamente sono definiti termici i neutroni con energia pari a 0.025 eV, ma il criterio utilizzato convenzionalmente per le determinazioni sperimentali sfrutta un effetto dovuto ai neutroni sotto la cosiddetta soglia del Cadmio, che è 0.5 eV, e definisce come fluenza termica la fluenza di neutroni da 0.025 eV che darebbero l'effetto misurato.

A seconda dell'energia dei neutroni, vi sono diversi meccanismi di interazione probabili; i processi si dividono in due categorie, *scattering* e assorbimento. La prima si suddivide a sua volta in elastico ed anelastico, mentre la seconda comprende fondamentalmente la cattura radiativa, cioè l'assorbimento di un neutrone e il rilascio di un fotone, la produzione di particelle cariche (un protone o una particella alfa e un nucleo di rinculo), e la fissione nucleare.

I neutroni veloci causano principalmente *scattering* elastico e con il diminuire dell'energia aumenta la probabilità di reazioni nucleari. In particolare i neutroni termici hanno elevata sezione d'urto per svariati isotopi che possono essere contenuti nei materiali di interesse, e quindi per la caratterizzazione di un fascio è importante determinarne il rateo di fluenza.

I campi di radiazione generati da neutroni sono campi misti; è presente una componente gamma dovuta al fondo del reattore e alle interazioni con i materiali di collimazione e moderazione.

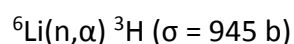
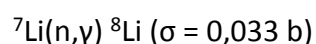
Gli effetti biologici sono strettamente collegati all'energia assorbita e ai valori di LET e RBE. In tessuti biologici i neutroni termici reagiscono fondamentalmente con l'Azoto  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  ( $\sigma = 1.81 \text{ b}$ ;  $p=0.63 \text{ MeV}$ ) e con l'Idrogeno  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  ( $\sigma = 0.33 \text{ b}$ ;  $E_\gamma=2.2 \text{ MeV}$ ) in campioni di piccole dimensioni è predominante la dose dovuta ai protoni generati da reazioni con l'Azoto (LET elevato) mentre in campioni di grandi dimensioni è predominante la dose gamma a causa della grande quantità di Idrogeno presente nel tessuto. Nel caso della BNCT (vedi appendice 1) è selettivamente accumulato l'isotopo  $^{10}\text{B}$  all'interno delle cellule cancerogene entro le quali, in seguito a irraggiamento con neutroni termici/epitermici, si ha una dose ad elevato RBE dovuta alle particelle cariche generate dalla radiazione  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  ( $\sigma = 3837\text{b}$ ) e quindi anche per queste è importante la conoscenza della fluenza termica. Nel caso di radioterapia con neutroni veloci effettuata in alcuni centri l'effetto terapeutico è dovuto a nuclei di rinculo principalmente protoni.

È quindi di significativa importanza la determinazione delle singole componenti di dose caratterizzate da diverso LET. Per questo motivo la dosimetria in questi campi di radiazione è assai complessa. È infatti necessario individuare i contributi di dose che si vogliono determinare nel mezzo di interesse (tipicamente tessuto) e i contributi della dose assorbita nel materiale che costituisce il dosimetro.

Bisogna tener presente che un dosimetro esposto a un fascio di neutroni, sia in fantoccio che in aria, riceve sia la radiazione gamma che i neutroni caratteristici della posizione del campo di radiazione in cui esso è collocato. Quindi la risposta del dosimetro contiene il contributo di dose gamma del campo e quello delle dosi causate dalle interazioni neutroniche che avvengono all'interno del dosimetro.

Al fine di separare tali contributi si sono utilizzati in questa campagna di misure diversi dosimetri a stato solido: dosimetri a termoluminescenza (TLD Termo Luminescence Detector), dosimetri di alanina e dosimetri a gel di Fricke.

I dosimetri TLD di fluoruro di litio drogato con magnesio e titanio (LiF;Mg,Ti) sono vantaggiosi per eseguire misure in campi misti n- $\gamma$  in quanto i due isotopi di Litio presenti  $^7\text{Li}$  e  $^6\text{Li}$  offrono una diversa sezione d'urto per neutroni termici.



Nella reazione con il  $^7\text{Li}$ , la radiazione gamma prodotta, a causa della sua elevata energia, non rilascia una quantità significativa di energia all'interno del dosimetro; quindi se si riuscisse a produrre un



TLD contenente solo  $^7\text{LiF}$ , questo risulterebbe insensibile ai neutroni, e potrebbe quindi essere utilizzato per la valutazione della dose gamma. Al contrario, le particelle secondarie prodotte dalla reazione dei neutroni termici con il  $^6\text{Li}$  depositano praticamente tutta la loro energia all'interno del dosimetro; questo fatto, unito all'elevata sezione d'urto, comporta che i TLD con un'alta percentuale di questo isotopo sono adatti per la valutazione della fluenza termica in un campo misto n- $\gamma$ .

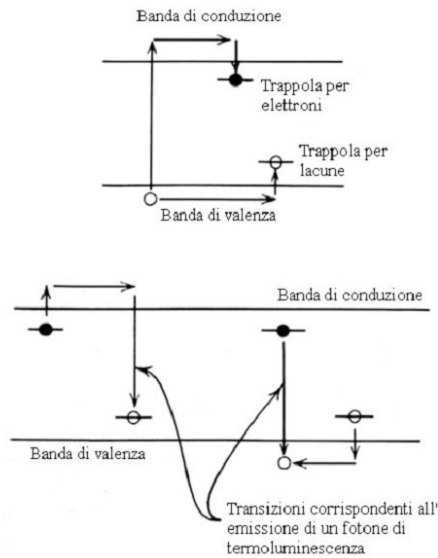
È importante specificare che per elevati flussi di neutroni, come nel caso dei fasci del reattore LVR-15, i metodi dosimetrici standard per campi misti n- $\gamma$  sviluppati per la dosimetria ambientale o personale, non possono essere applicati. Infatti in tali campi le fluenze dei neutroni termici sono sempre molto basse per cui la piccola percentuale di  $^6\text{LiF}$  contenuta nei TLD-700 non causa un contributo apprezzabile alla dose misurata. Quindi i TLD-700 sono adeguatamente utilizzati per misurare la componente gamma del campo di radiazione. I TLD-600 hanno una sensibilità alla radiazione gamma simile a quella dei TLD-700 ma l'elevato contenuto di  $^6\text{LiF}$  fa sì che nella loro risposta ci sia un contributo misurabile di dose dovuta alle particelle cariche generate dalle reazioni prodotte dai neutroni termici. Quindi la risposta di tali dosimetri previa sottrazione del contributo gamma può essere utilizzata per misurare la fluenza dei neutroni termici.

Invece in presenza di ratei di fluenza termica molto elevati non è trascurabile, nella risposta dei TLD-700, il contributo dovuto ai neutroni termici (Aschan et al., 1999; Burgkhardt et al., 2006). È quindi necessario studiare e sviluppare metodi per poter valutare le componenti presenti in un campo di radiazione con tali caratteristiche.

## 2. DOSIMETRI A TERMOLUMINESCENZA (TL)

Per caratterizzare le colonne BNCT ed HK1 abbiamo utilizzato, come visto nel capitolo precedente, dei rivelatori a termoluminescenza (TLD). Questi dosimetri costituiti da cristalli isolanti e semiconduttori opportunamente drogati si basano sul fenomeno della termoluminescenza, processo per il quale vi è un'emissione luminosa rilevata durante il riscaldamento del campione precedentemente irraggiato con radiazione ionizzante; l'emissione risulta proporzionale alla dose assorbita.

La struttura cristallina del dosimetro può essere descritta utilizzando un modello elettronico a bande, che considera la banda di valenza e quella di conduzione; nella regione intermedia tra le due bande si trovano dei livelli energetici, causati dai difetti nella struttura cristallina dovuti al drogaggio del cristallo; questi livelli nella banda "proibita" fungono da trappole elettroniche o da centri di ricombinazione. Il processo (rappresentato in figura 1) è così schematizzabile: il materiale assorbe energia dalla radiazione ionizzante così che alcuni elettroni passano dalla banda di valenza a quella di conduzione, generando delle lacune nella banda di valenza stessa. Gli elettroni possono ritornare in banda di valenza oppure cadere nelle trappole. In seguito a un irraggiamento si otterranno un numero di coppie di elettroni e buche proporzionale alla dose assorbita dal dosimetro. A questo punto se si fornisce energia sotto forma di calore al dosimetro gli elettroni escono dalle trappole e si portano in genere sulla banda di conduzione da cui ricadono o nella banda di valenza o in livelli energetici intermedi dovuti ai difetti. In corrispondenza di questi fenomeni l'energia è emessa sotto forma di "luminescenza". La probabilità di liberare trappole dipende esponenzialmente dalla profondità delle trappole stesse e dalla temperatura con cui il cristallo viene riscaldato. Si ha quindi per ogni trappola una emissione termoluminescente che cresce all'aumentare della temperatura fino ad un massimo oltre il quale l'emissione diminuisce a causa dello svuotamento delle trappole stesse. Durante il riscaldamento del dosimetro si rivela quindi una termoluminescenza che è la convoluzione dei picchi dovuti alle singole trappole.



*Figura 1: Schema del processo di termoluminescenza*

Per ulteriori informazioni si rimanda ad uno studio più approfondito nell'ambito della fisica dello stato solido.

## 2.1 GLOW CURVE

La risposta di ogni dosimetro è ottenuta dall'acquisizione dei fotoni emessi, raccolti da un tubo fotomoltiplicatore, durante il riscaldamento, in genere lineare nel tempo, di ciascun TLD; la curva così ottenuta prende il nome di Glow Curve (GC).

In un determinato campo di radiazioni la forma della GC è caratteristica del tipo di TLD. In presenza di campi misti si può osservare una variazione nella forma della GC. Infatti questa è una convoluzione dei tanti picchi relativi alle diverse trappole presenti nel cristallo, popolate diversamente a seconda del tipo di radiazione.

Nelle figure 2 e 3 sono rappresentati due esempi di GC rispettivamente per un TLD-100 irraggiato in campo gamma e per un TLD-100 irraggiato nel campo misto del reattore LVR-15.

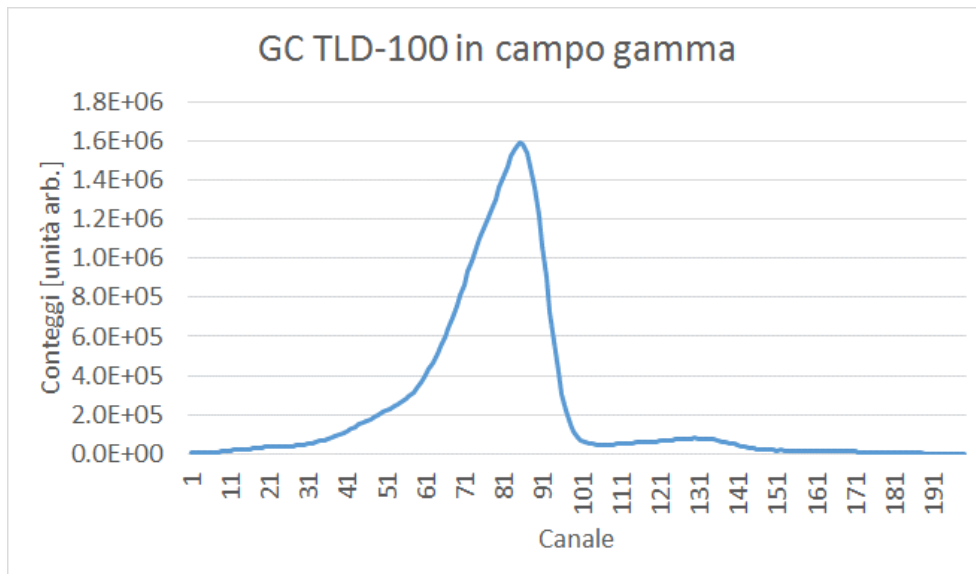


Figura 2: Esempio di Glow Curve (GC) di TLD-100 irraggiato in campo gamma

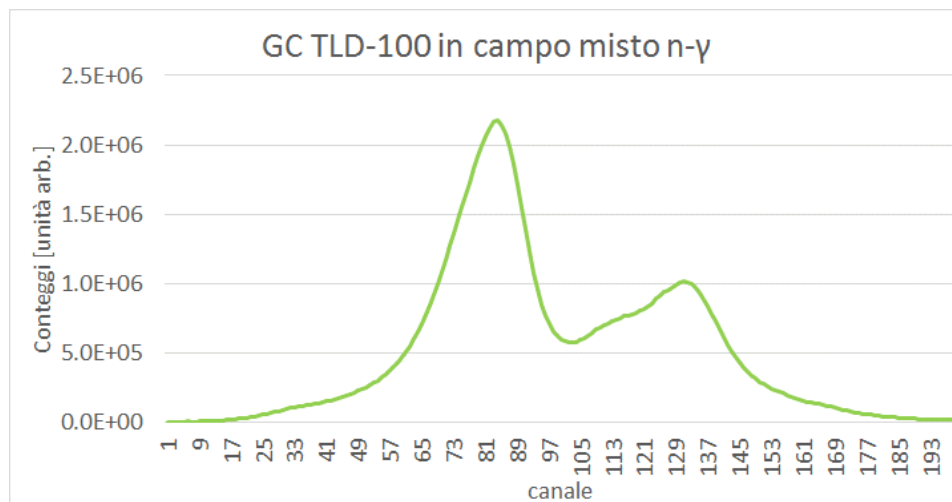


Figura 3: Esempio di Glow Curve (GC) di TLD-100 irraggiato in campo misto

Come si può notare la differenza di campo di radiazione causa una notevole differenza nella forma della GC.

## 2.2 DOSIMETRI A TL DI LiF

Abbiamo utilizzato dosimetri a termoluminescenza (TL) di fluoruro di litio drogati con magnesio e titanio (LiF:Mg,Ti), sotto forma di chips di dimensioni 3,1 x 3,1 x 0,9 mm<sup>3</sup> (Harshaw Chemical &Co). Questi sono commercializzati coi nomi TLD-700, TLD-100 e TLD-600 che corrispondono a tre diverse composizioni isotopiche, ovvero con diverse quantità degli isotopi <sup>6</sup>LiF e <sup>7</sup>LiF in essi contenuti, come riportato nella tabella 2.

	<sup>6</sup> LiF%	<sup>7</sup> LiF%
TLD-700	~0.01	~99.99
TLD-100 (naturale)	7.5	92.5
TLD-600	95.6	4.4

*Tabella 2: Composizione delle diverse tipologie di TLD di LiF utilizzati nelle misure*

Questi diversi TLD hanno sensibilità ai fotoni molto simili tra loro, mentre presentano una sensibilità notevolmente diversa ai neutroni termici a causa del diverso contenuto dell'isotopo <sup>6</sup>Li. Infatti come si è visto precedentemente i neutroni termici interagiscono con il <sup>7</sup>Li secondo la reazione <sup>7</sup>Li(n,γ)<sup>8</sup>Li ( $\sigma = 0,033$  barn) e con il <sup>6</sup>Li secondo la reazione <sup>6</sup>Li(n,α)<sup>3</sup>H ( $\sigma = 945$  barn). A causa dell'elevata sezione d'urto della reazione con il <sup>6</sup>Li, nel caso degli alti ratei di fluensa termica presenti in fasci da reattore, anche la esigua quantità di <sup>6</sup>Li contenuta nei TLD-700 fa sì che la componente neutronica del fascio provochi un contributo non trascurabile nella risposta del dosimetro (Aschan et al., 1999; Burgkhardt et al., 2006). I TLD-600, sensibili quasi esclusivamente ai neutroni termici in questi campi, hanno lo svantaggio di avere una soglia di fluensa molto bassa, circa  $2 \cdot 10^9$  cm<sup>-2</sup>, dopo la quale iniziano a perdere linearità (Ayyangar et al., 1974) della risposta e subire danneggiamento da radiazione (Gambarini et al., 1997, 2004a). Inoltre questi dosimetri presentano una notevole dipendenza della risposta dall'orientamento di questi rispetto all'asse del fascio, in quanto in <sup>6</sup>LiFi il 50% dei neutroni termici è assorbito in uno strato di 0,1 mm (Wang et al., 1990, Becher, 1973). Questa caratteristica rende problematico l'utilizzo di TLD-600 in casi di parziale anisotropia dei fasci, come nella situazione coinvolta. Per i TLD-100 la soglia critica è di poco superiore a  $10^{10}$  cm<sup>-2</sup> (Ayyangar et al., 1974), e la loro composizione isotopica fa sì che essi siano sensibili ad entrambi i contributi di radiazione. I TLD-700, a causa del bassissimo contenuto <sup>6</sup>LiF, hanno il vantaggio di avere una soglia di danneggiamento notevolmente più alta (Piesch et al., 1978), in quanto la fluensa critica è superiore ai  $10^{13}$  cm<sup>-2</sup>; inoltre la loro risposta non dipende sensibilmente dal loro orientamento spaziale, differentemente dai TLD-100 e TLD-600.

## 2.3 PROCEDURE SPERIMENTALI

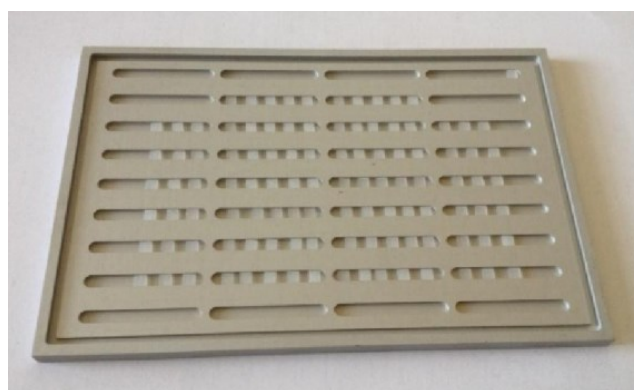
Per le misure al reattore LVR-15 sono stati utilizzati 55 TLD-700, 50 TLD-100 e 5 TLD-600 mai utilizzati per irraggiamenti precedenti. I dosimetri acquistati avevano una uniformità di risposta del 5% dichiarata dalla ditta, per avere risultati con la massima precisione possibile è stata fatta una calibrazione personalizzata di ciascun dosimetro. A tale scopo ad ogni dosimetro è stato attribuito un codice alfa-numerico in modo che ogni TLD fosse riconoscibile.

### 2.3.1 ANNEALING

L'annealing è una procedura di rigenerazione dei dosimetri a TL che ha lo scopo di vuotare completamente le trappole e ripristinare la distribuzione energetica dei difetti in modo da garantire una buona riproducibilità della risposta. Per ottenere validi risultati in questo lavoro è stato eseguito un processo di annealing dei TLD prima di ogni irraggiamento. Il processo di annealing è articolato nel modo seguente: un'ora alla temperatura di 400°C in un forno preriscaldato; due ore alla temperatura di 100°C in un altro forno anch'esso preriscaldato; infine raffreddamento a temperatura ambiente.

Per il processo di annealing i TLD sono stati collocati in un contenitore di Alluminio anodizzato costituito da una matrice di scanalature di nove righe e quattro colonne. I TLD-700 hanno subito un annealing separato da quello subito dai TLD-100 e TLD-600 per evitare un eccessivo riempimento del contenitore. Ogni singolo annealing prevedeva il trattamento dei TLD distribuiti nelle cave del contenitore di Alluminio anodizzato. Per minimizzare gli effetti nella risposta dovuti a differenze nei ratei di riscaldamento e raffreddamento durante l'annealing si è avuto cura di mantenere i diversi TLD nella medesima posizione del contenitore di Alluminio anodizzato per ogni processo di annealing. Per avere una maggiore uniformità nelle risposte dei dosimetri si è cercato di occupare la regione centrale del contenitore di Alluminio anodizzato in modo che i TLD subissero ratei di riscaldamento e raffreddamento più vicini possibile.

In figura 4 è mostrato il contenitore di Alluminio anodizzato utilizzato per le operazioni di annealing.



*Figura 4: TLD in contenitore di Alluminio anodizzato*

È importante che durante la procedura di annealing i TLD rimangano rigorosamente al buio e quindi il coperchio del contenitore è opportunamente sagomato in modo tale da impedire l'ingresso di luce.

L'annealing è stato effettuato prima di ogni irraggiamento come già specificato ed è stata prestata particolare attenzione a seguire rigorosamente il protocollo, soprattutto nella fase di raffreddamento, dato che questo processo influisce notevolmente sulla sensibilità di ciascun dosimetro.

### **2.3.2 STABILIZZAZIONE DELLA RISPOSTA DI TLD NUOVI**

Poiché i TLD utilizzati erano nuovi è stato necessario, prima del loro utilizzo, stabilizzare la risposta mediante 5 cicli di irraggiamento e successivo annealing. Gli irraggiamenti sono stati effettuati con una sorgente di fotoni di  $^{137}\text{Cs}$  usualmente utilizzata per irraggiamento di materiale biologico presso l'Istituto dei Tumori di Milano. Per ogni irraggiamento è stata somministrata una dose di 0.5 Gy. In seguito a ogni irraggiamento è stato eseguito il processo di annealing precedentemente descritto.

### **2.3.3 METODO DI ANALISI DEI TLD**

L'analisi dei TLD è stata effettuata utilizzando uno strumento della Bicron (Harshaw modello TLD 3500), mostrato in figura 5. Al fine di effettuare le analisi i dosimetri devono essere collocati su un piattello, che viene riscaldato mediante un sistema per il quale possono essere impostati manualmente i parametri di riscaldamento e analisi. La termoluminescenza emessa durante il riscaldamento è rivelata da un tubo fotomoltiplicatore completo di relativa elettronica. Grazie ad un opportuno software (WinRems) è possibile ottenere le varie GC, ovvero l'emissione TL in funzione del tempo.



*Figura 5: Strumento della Bicron (Harshaw modello TLD 3500)*

Per le nostre analisi abbiamo scelto un intervallo termico [120°C-350°C] con un riscaldamento preliminare di 2 secondi fino a 120° C e successivo riscaldamento lineare con un rateo costante pari a 7 °C/s. Per evitare effetti di triboluminescenza nella GC misurata ed evitare che i dosimetri assorbano impurezze dall'aria durante la fase di riscaldamento-analisi e successivamente fino al raggiungimento temperatura di 50°C i TLD erano mantenuti in atmosfera di Azoto.

In figura 6 è riportata una GC e su scala secondaria la rampa termica di riscaldamento.



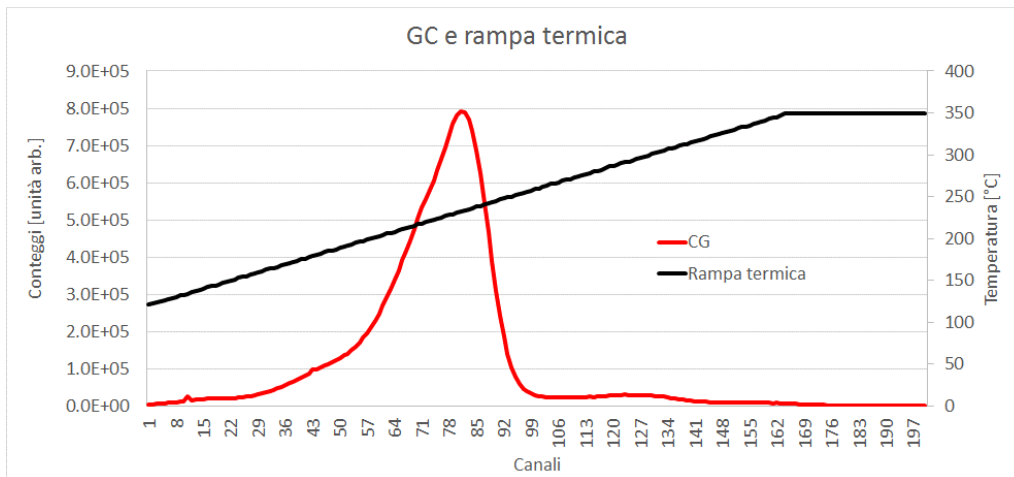


Figura 6: Esempio di GC di un TLD-700 con corrispondente rampa termica

La cura nell'effettuare le operazioni di analisi è essenziale: infatti ogni singolo chip deve essere centrato manualmente sul piattello di riscaldamento con grande precisione, per mantenere fisso l'angolo solido con cui è rivelata l'emissione. Inoltre vi sono altri fattori critici importanti, soprattutto legati alla termalizzazione del sistema: per ogni ciclo di analisi è stata data tensione allo strumento e aperto il rubinetto dell'azoto 30 minuti prima dell'inizio delle misure.

### 2.3.4 CALIBRAZIONE CON FOTONI

Le calibrazioni con fotoni sono state effettuate dopo aver visto la risposta delle misure al reattore LVR-15 presso il centro di ricerca di Řež, per individuare la regione di dose opportuna per la calibrazione. Se infatti questa è fatta nell'intorno delle dosi di utilizzo, risultano minimizzate le conseguenze della non linearità dei vari picchi della GC. Le calibrazioni sono state effettuate entro una collaborazione con l'Istituto Nazionale dei Tumori di Milano, dove si trova un'unità di telecobaltoterapia utilizzata per trattamenti radioterapici. Il  $^{60}\text{Co}$  decade  $\beta^-$  in  $^{60}\text{Ni}$ , emettendo raggi gamma di 1.17 MeV e 1.33 MeV. I TLD sono stati posti in un fantoccio di polietilene, avente all'interno delle apposite scanalature parallele tutte sullo stesso piano, lo strato di polietilene sopra dette scanalature aveva uno spessore di 4 mm. Questo fantoccio è stato collocato con il piano delle scanalature normale alla direzione del fascio ad una distanza di 2 metri dalla sorgente di  $^{60}\text{Co}$ , ed è stato centrato grazie ad un dispositivo a raggi laser. In questa maniera i dosimetri a termoluminescenza sono stati irraggiati uniformemente con un rateo di dose di 0.102 Gy/minuto (al 18 ottobre 2013). La vita media del  $^{60}\text{Co}$  è di 5.27 anni, quindi il rateo non varia sensibilmente per irraggiamenti effettuati in giorni vicini, mentre bisogna tenere conto della variazione per irraggiamenti effettuati con una certa distanza nel tempo.

Ogni irraggiamento è stato fatto tramite la seguente procedura:

- Posizionamento del contenitore di polietilene contenente i TLD sotto la testata a una distanza di 2 metri.
- Chiusura del portellone del locale di irraggiamento.
- Impostazione del timer apposito per la durata di irraggiamento precedentemente valutata per avere la dose desiderata e azionamento del meccanismo di movimentazione della sorgente.

Si sono eseguite due calibrazioni per i TLD-700 e una sola per i TLD-100. In entrambi i casi le calibrazioni sono state effettuate dopo aver visto la risposta delle misure al reattore, per individuare la regione di dose opportuna per la calibrazione. Se infatti questa è fatta nell'intorno delle dosi di utilizzo, risultano minimizzate le conseguenze della non linearità dei vari picchi della GC.

Per quanto riguarda il primo irraggiamento di taratura, i TLD-700 sono stati divisi in tre gruppi (GRUPPO 1, GRUPPO 2 e GRUPPO 3) e irraggiati somministrando dosi di 0.2 Gy al GRUPPO 1, 0.4 Gy al GRUPPO 2 e 0.7 Gy al GRUPPO 3. Per quanto riguarda il secondo irraggiamento di taratura, al GRUPPO 1 è stata somministrata una dose di 0.7 Gy, al GRUPPO 2 è stata somministrata una dose di 0.2 Gy mentre al GRUPPO 3 una dose di 0.4 Gy.

Per quanto riguarda i TLD-100, questi sono stati divisi in sette gruppi a cui sono state somministrate dosi rispettivamente di 0.2 Gy, 0.4 Gy, 0.7 Gy, 1 Gy, 2.5 Gy, 6 Gy e 7 Gy.

Questi irraggiamenti coi fotoni hanno avuto un duplice scopo: verificare la linearità dei dosimetri nell'intervallo di dose di interesse e tarare la risposta di ogni singolo chip.

E' stata verificata la linearità delle altezze (h1 ed h2) dei due picchi dosimetrici delle GC dei TLD-700 e TLD-100 in funzione della dose gamma somministrata durante l'irraggiamento di calibrazione valutando i valori medi di tali altezze per ogni categoria di dosimetri.

Questi risultati sono riportati nelle tabelle 3 e 4.

	TLD-700			
	Calibrazione 1		Calibrazione 2	
Dose (Gy)	h1 (unità arb.)	h2 (unità arb.)	h1 (unità arb.)	h2 (unità arb.)
0.2	7.66E+05	2.91E+04	8.00E+05	3.00E+04
0.4	1.52E+06	6.04E+04	1.62E+06	6.18E+04
0.7	2.70E+06	1.20E+05	2.84E+06	1.15E+05

Tabella 3: Valori della media delle altezze dei picchi dosimetrici in unità arbitrarie dei TLD-700 in funzione della dose somministrata

TLD-100		
Calibrazione 1		
Dose (Gy)	h1 (unità arb.)	h2 (unità arb.)
0.2	7.62E+05	3.25E+04
0.4	1.54E+06	7.94E+04
0.7	2.73E+06	1.54E+05
1	3.96E+06	2.62E+05
2.5	9.89E+06	8.47E+05
6	2.69E+07	3.01E+06
7	3.11E+07	3.64E+06

Tabella 4: Valori della media delle altezze dei picchi dosimetrici in unità arbitrarie dei TLD-100 in funzione della dose somministrata

Nelle figure 7 e 8 sono rappresentati i dati riportati nella tabella 3 e nella figura 9 sono rappresentati i dati della tabella 4.

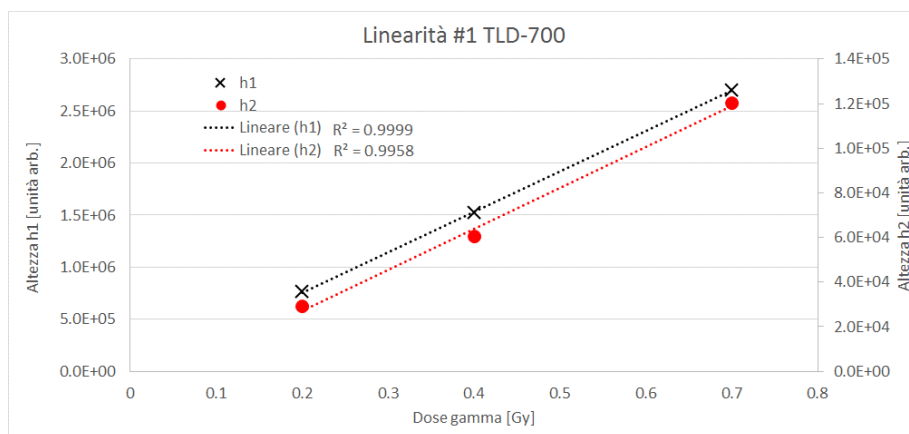


Figura 7: Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-700 in funzione della dose gamma somministrata relativi alla prima calibrazione con fotoni

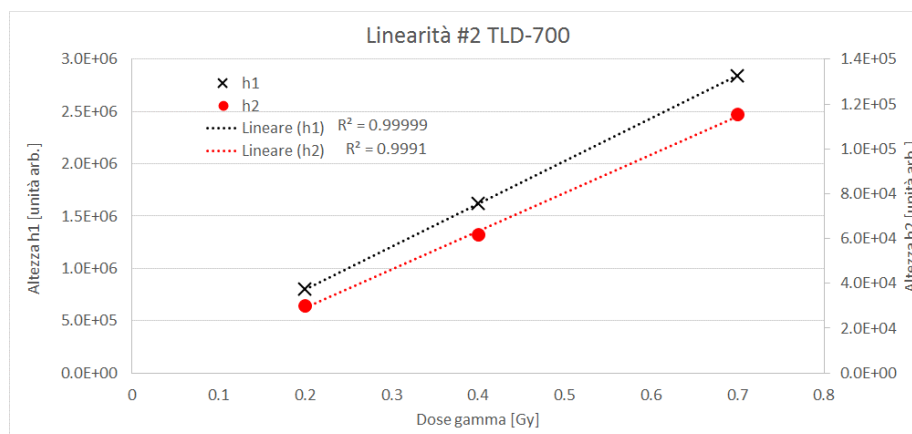


Figura 8: Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-700 in funzione della dose gamma somministrata relativi alla seconda calibrazione con fotoni

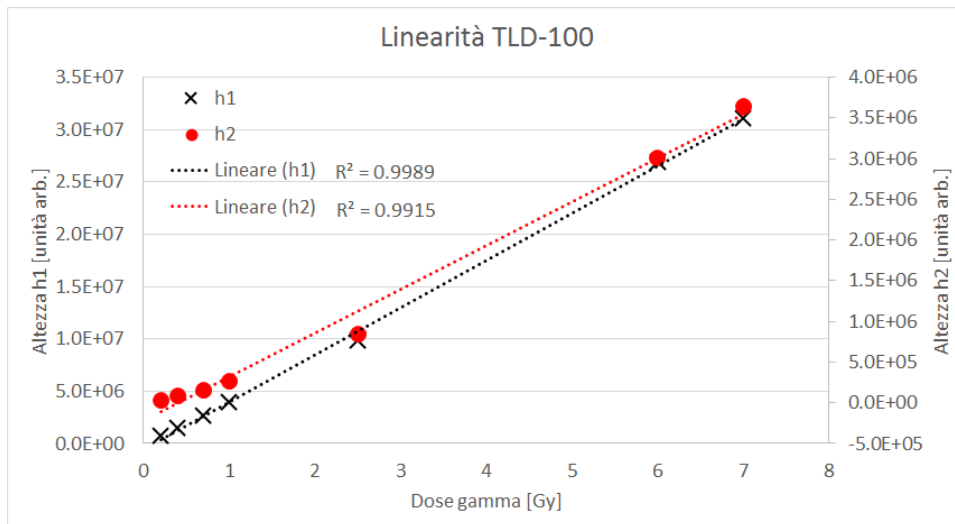


Figura 9: Altezza dei picchi dosimetrici h1 e h2 dei TLD-100 in funzione della dose gamma somministrata durante la calibrazione con fotoni

Si evince che per i TLD-700, dove le dosi coinvolte sia per le tarature che per le misure sono al di sotto del 1 Gy, è valido l'utilizzo di una calibrazione lineare. Riguardo ai TLD-100 è osservabile un effetto di sottolinearità nella regione al disotto del 1 Gy di entità diversa relativamente al primo e al secondo picco. Le dosi assorbite dai TLD-100 durante gli irraggiamenti al reattore erano tutte al di sopra del 1 Gy e quindi questi effetti di sottolinearità non influiscono nei risultati delle misure.

I due irraggiamenti con i fotoni per i TLD-700 sono stati altresì importanti per la calibrazione della sensibilità di ogni singolo dosimetro. A questo scopo abbiamo considerato l'area sottesa ad ogni GC; dopo aver fatto la media delle aree sottese per ogni gruppo di TLD irraggiati alla stessa dose, per ogni singolo TLD abbiamo diviso l'area sottesa per l'area media ed abbiamo ottenuto un coefficiente, intorno al valore dell'unità, che indica la sensibilità del singolo TLD. Abbiamo ripetuto l'operazione per entrambe le calibrazioni ed infine, mediando i due coefficienti di sensibilità così trovati, abbiamo ricavato il coefficiente finale con cui correggere i dati di risposta per ogni singolo dosimetro. Tale operazione è stata eseguita solo per i TLD-700 in quanto dalle analisi dei dati degli irraggiamenti a Řež si è notato che i TLD-100 risultavano inaffidabili al nostro scopo come verrà mostrato nel capitolo 4 e di conseguenza sarebbe stato inutile eseguire altre operazioni di calibrazione anche per questi dosimetri.

Nella figura 10 sono raffigurati i coefficienti di sensibilità dei TLD-700 irraggiati alle varie dosi di calibrazione.

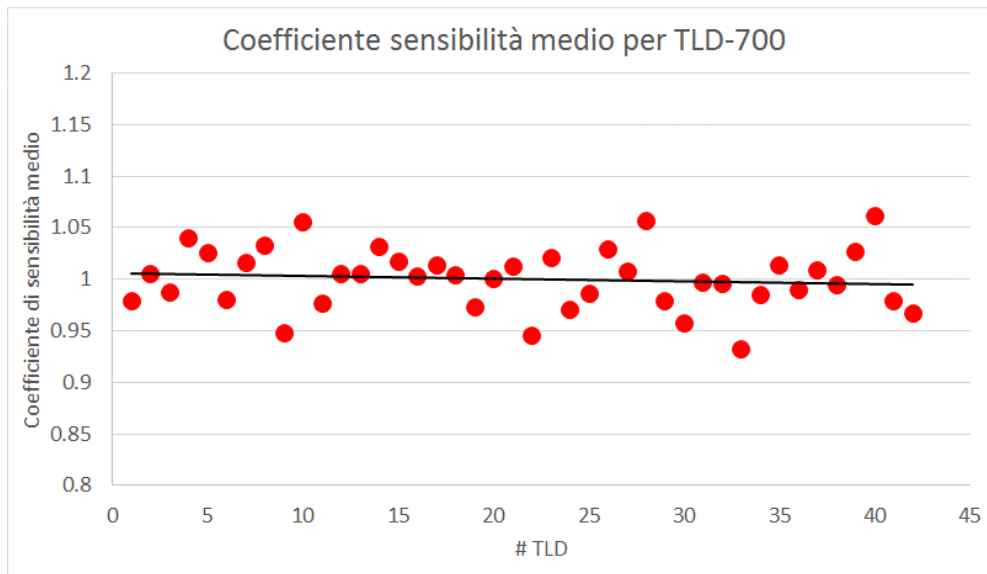


Figura 10: Coefficienti di sensibilità medi per i TLD-700 ricavati dalla doppia calibrazione con fotoni

Dai dati della figura 10 si può notare come la dispersione sia uniforme e non dipenda sensibilmente dalla dose di irraggiamento.

## 2.4 PROBLEMATICHE IN ALTI FLUSSI DI NEUTRONI

Sono molto complesse misure di dose gamma in campi di radiazione in cui è presente anche un elevato rateo di fluena termica, come possono essere i campi caratteristici utilizzati per *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT).

Per la rivelazione di fotoni in campi misti n- $\gamma$ , i rivelatori maggiormente utilizzati sono i TLD di LiF, in particolare la coppia TLD-700 e TLD-600. I TLD-700 danno buoni risultati per quanto riguarda la misura della dose gamma sia ambientale che personale dove il contributo della fluena termica è trascurabile. Invece, nella risposta di tali dosimetri irraggiati in campi per BNCT, o comunque in fasci da reattore nucleare dove le fluene termiche sono molto elevate, la piccolissima quantità di  $^6\text{LiF}$  contenuta nei TLD-700 fa sì che il contributo alla dose assorbita dovuto ai neutroni termici non sia trascurabile. Se infatti fosse possibile produrre dosimetri contenenti esclusivamente  $^7\text{LiF}$  (al 100%) questi non sarebbero sensibili ai neutroni termici. Di conseguenza quando si effettuano misure in questi campi di reattore nucleare per valutare la dose con TLD-700 è necessario eseguire una adeguata separazione dei contributi alla dose ricevuta dal dosimetro (Aschan et al., 1999; Burgkhardt et al., 2006).

Per poter valutare la dose gamma in campi di neutroni termici o epitermici potrebbero essere utilizzati i TLD-300 ossia  $\text{CaF}_2(\text{Tm})$ ; tali dosimetri hanno una bassissima sensibilità ai neutroni per energie sotto i 10 MeV e di conseguenza potrebbero esser utilizzati per misurare la sola dose gamma

in campi di neutroni termici o epitermici. I TLD-300 presentano però una sensibilità ai fotoni che dipende fortemente dall'energia dei fotoni nella regione delle basse energie (Gambarini et al., 2004<sup>o</sup>). Lo spettro della radiazione gamma del fondo di un reattore si estende anche alle basse energie rendendo quindi inutilizzabili questi dosimetri in situazioni in cui il fondo del reattore non sia divenuto trascurabile. Infatti potrebbero esser utilizzati in fantoccio tessuto equivalente ad una profondità superiore a qualche cm (in genere 3 o 4 cm) dove la dose è fondamentalmente dovuta ai gamma da 2.2 MeV generati dalle interazioni dei neutroni termici con l'idrogeno.

Nella dosimetria per BNCT sono comunemente utilizzati i TLD-700 e viene valutata la correzione da apportare alla risposta per eliminare il contributo dovuto ai neutroni termici. A tale scopo sono effettuate determinazioni di fluensa termica, in ciascuna posizione in cui è collocato ciascun dosimetro TLD-700 o mediante misure per attivazione o mediante simulazioni Monte Carlo o con l'utilizzo di TLD-600 quando è possibile utilizzare fluenze che non arrivino ai limiti di linearità della risposta descritti nel paragrafo 2.2.

Un metodo completamente diverso per ricavare la dose gamma mediante dosimetri di LiF è stata proposta dal gruppo di ricerca presso cui è stata svolta l'attività di questa tesi che è parte dello sviluppo e della validazione di questo metodo. Nel metodo proposto (Gambarini et al., 2008, 2010a) sono ottenute sia la dose gamma che la fluensa termica dalla GC di un solo TLD di LiF come descritto nel paragrafo seguente.

## **2.5 METODO DI SEPARAZIONE DI DOSE GAMMA E FLUENZA TERMICA**

In regime di linearità della risposta in funzione della energia assorbita è possibile mettere in relazione l'altezza dei due picchi dosimetrici dei TLD alla dose gamma ( $D_\gamma$ ) e alla fluensa termica ( $\Phi_{th}$ ) mediante dei semplici algoritmi (Gambarini et al., 2008, 2010a).

La risposta  $R$ , comunque essa sia definita, di un TLD irraggiato in un campo misto sarà data dalla somma di un contributo dovuto alla radiazione gamma e un contributo dovuto alle particelle cariche prodotte da neutroni termici. Questi contributi peseranno sulla risposta  $R$  con un proprio coefficiente di sensibilità ( $\alpha$  e  $\beta$  rispettivamente).

$$R = \alpha \cdot D_\gamma + \beta \cdot \Phi_{th} \quad (1)$$

Assumendo, per le ipotesi fatte precedentemente, come risposta le altezze dei due picchi dosimetrici delle GC, si può scrivere:

$$\begin{cases} h1 = h1_{\gamma} \cdot D_{\gamma} + h1_n \cdot \Phi_{th} \\ h2 = h2_{\gamma} \cdot D_{\gamma} + h2_n \cdot \Phi_{th} \end{cases} \quad (2)$$

dove h1 e h2 sono le altezze di due picchi dosimetrici della GC misurata dopo gli irraggiamenti in campo misto, h1<sub>γ</sub> ed h2<sub>γ</sub> sono le altezze dei due picchi della GC di irraggiamento con soli fotoni per unità di dose e h1<sub>n</sub> e h2<sub>n</sub> sono le altezze dei due picchi per unità di fluensa termica di una GC ottenuta irraggiando con soli neutroni termici. Risolvendo il sistema di equazioni (2) sopra portato si esplicitano la dose gamma e la fluensa termica ricevuta dal dosimetro durante gli irraggiamenti in campo misto:

$$D_{\gamma} = \frac{h2 \cdot R_n - h1}{h2_{\gamma} \cdot R_n - h1_{\gamma}} \quad (3)$$

$$\Phi_{th} = \frac{h2 \cdot R_{\gamma} - h1}{h2_n \cdot R_{\gamma} - h1_n} \quad (4)$$

dove con R<sub>n</sub> si è indicato il rapporto tra i due picchi dosimetrici h1<sub>n</sub> e h2<sub>n</sub> della GC dovuta a neutroni termici per unità di fluensa e con R<sub>γ</sub> si è indicato il rapporto tra i due picchi dosimetrici h1<sub>γ</sub> e h2<sub>γ</sub> della GC di calibrazione ai fotoni per unità di dose. Ovviamente le calibrazioni con fotoni sono facilmente effettuabili in quanto basta disporre di una sorgente di fotoni calibrata come ad esempio quelle usate per radioterapia mentre è più complesso ottenere calibrazioni con neutroni termici in quanto queste in genere devono essere effettuate in campi misti n-γ e deve quindi essere sottratto con la maggior precisione possibile il contributo dovuto alla radiazione gamma nella risposta del dosimetro da calibrare. Tuttavia dalla relazione (3) si deduce che la dose gamma può essere ottenuta senza la necessità di calibrare i dosimetri con i neutroni termici ma è sufficiente la calibrazione gamma in quanto il valore del rapporto R<sub>n</sub> è ottenibile senza necessità di calibrazione con i neutroni. Infatti questo rapporto è molto simile per tutti i TLD di LiF:MgTi, analizzati con gli stessi parametri di riscaldamento ed è ricavabile senza bisogno di calibrazione. Se si volesse ottenere tale rapporto dai TLD-100 o dai TLD-700 sarebbe necessario sottrarre adeguatamente il contributo gamma mentre si può ottenere direttamente dai TLD-600 in quanto il contributo della radiazione gamma alla risposta di questi dosimetri è trascurabile in questi campi di reattore. In questo lavoro quindi è stato ricavato utilizzando TLD-600 non calibrati. Data l'elevata sensibilità di questi dosimetri ai neutroni termici si sono scelte geometrie e tempi di irraggiamento tali da non raggiungere situazioni di deformazione delle CG dovute alla saturazione di alcune trappole. Il rapporto R<sub>n</sub> così ricavato e in seguito utilizzato nelle analisi è risultato pari a 1.7.

Per ogni TLD-100 e TLD-700 sono stati separati i contributi nella risposta della radiazione gamma e della fluensa termica secondo il metodo seguente:

- E' stata corretta la GC ottenuta dall'irraggiamento al reattore utilizzando il coefficiente di sensibilità caratteristico dello specifico TLD.
- La GC di taratura coi fotoni di ogni TLD è stata normalizzata per unità di dose e corretta per lo specifico coefficiente di sensibilità.
- Si è calcolata la dose gamma utilizzando la relazione (3).
- Si è moltiplicata la GC di taratura, normalizzata e corretta, per la dose gamma calcolata ottenendo così la curva relativa al contributo gamma nella risposta del dosimetro.
- Si è quindi sottratta questa curva di contributo gamma pixel a pixel alla GC ottenuta dall'irraggiamento al reattore, ottenendo così una curva che rappresenta il contributo nella risposta dovuto ai neutroni termici.

In figura 11 è mostrato un esempio di risultato dell'applicazione di tale metodo.

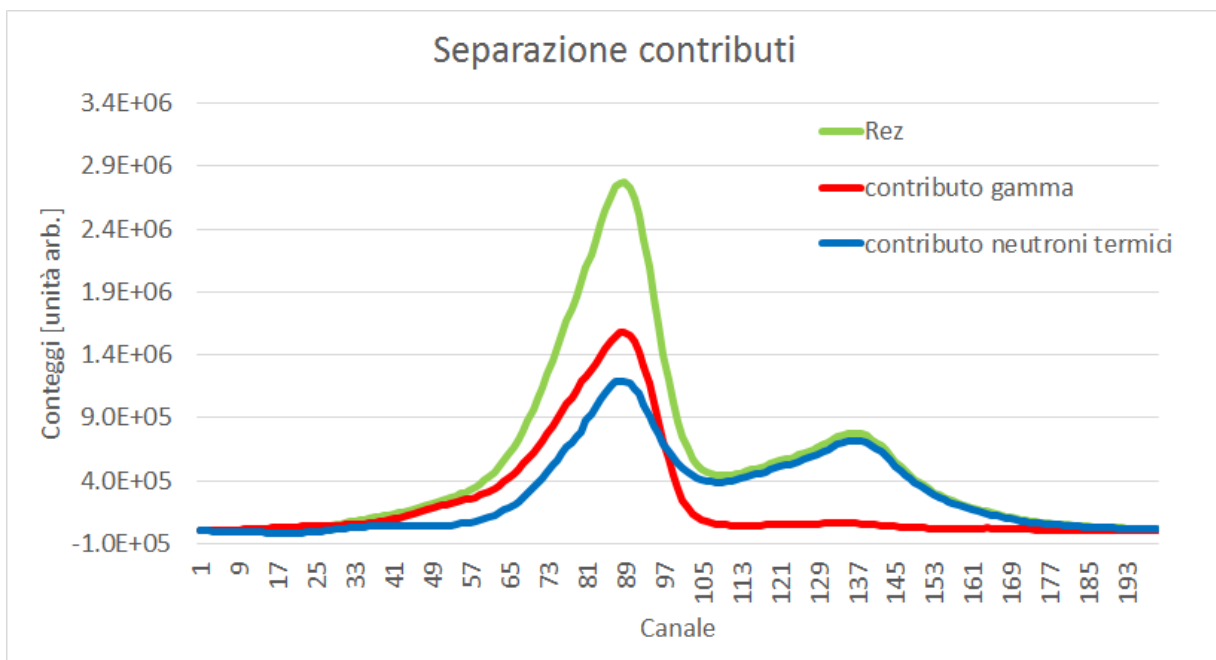


Figura 11: Separazione dei contributi con il metodo proposto

E' importante fare una osservazione; se i dosimetri sono calibrati sia con fotoni che con neutroni termici il metodo descritto permette di ricavare il valore della dose gamma e della fluensa termica utilizzando un solo dosimetro TLD in ogni posizione. Non si possono però ottenere risultati affidabili nel caso in cui uno dei due contributi nella risposta del dosimetro è trascurabile rispetto all'altro. Infatti osservando la relazione (3) nel caso in cui si avesse un contributo gamma trascurabile rispetto



al contributo dei neutroni termici si avrebbe al numeratore una differenza tra due valori molto elevati e tra loro molto vicini e di conseguenza l'errore statistico della differenza è molto più grande rispetto alla differenza stessa. Un effetto analogo si verifica utilizzando la relazione (4) nel caso opposto in cui si avesse un contributo dei neutroni termici trascurabile rispetto al contributo della dose gamma. Nei campi utilizzati nell'esperimento descritto i contributi dovuti alla radiazione gamma e ai neutroni termici erano tali da rendere applicabile il metodo ai TLD-700 mentre è risultato inapplicabile ai TLD-100 dove la dose gamma non è stata valutabile con la relazione (3) ma la risposta del dosimetro non conteneva solo il contributo dovuto ai neutroni termici. Per i TLD-100, non utilizzabili per la dose gamma, è stato quindi fatto uno studio per trovare un parametro adeguato per ricavare la fluenza termica.

## 3. MISURE PER ATTIVAZIONE

### 3.1 Configurazione irraggiamenti

Al fine di definire il coefficiente di calibrazione ai neutroni termici per i TLD, si sono fatte misure con metodo d'attivazione.

Si è scelto di effettuare misure con un solo tipo di foglietti di attivazione in quanto si era interessati alla sola determinazione del rateo di fluena di neutroni termici. Si sono fatti quindi irraggiamenti con foglietti nudi e con foglietti schermati con Cadmio.

A tale scopo si è scelto di utilizzare foglietti di Indio piuttosto che di altri materiali in quanto l'Indio attivato in seguito a reazione di cattura di neutroni termici è caratterizzato da un tempo di dimezzamento di 54.15 minuti, inferiore rispetto ai tempi di dimezzamento tipici di altri materiali come l'Oro rendendo possibile la misura subito dopo l'irraggiamento e una successiva disattivazione sufficiente per permettere il trasporto dei foglietti al termine della campagna di misure.

La reazione di attivazione su cui si è basata la misura è  $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$  che ha una elevata sezione d'urto pari a 157 b e il gamma emesso ha una energia di 416.7 KeV.

La misura dell'attivazione è stata fatta tramite un rivelatore a scintillazione e non con un rivelatore a semiconduttore per motivi logistici durante il trasporto.

Tali foglietti di Indio sono stati irraggiati in fantoccio e in supporto sottile per ottenere i ratei di fluena termica in entrambe le configurazioni:

#### FANTOCCIO:

Tali misure sono state eseguite per valutare l'andamento del rateo di fluena termica in profondità in un fantoccio di polietilene in cui si intendeva fare misure anche con altri dosimetri.

Tale fantoccio ha una forma cilindrica di diametro 16 cm e altezza di 14 cm, nella zona centrale è presente una cavità coassiale di diametro 6.5 cm e profondità 12 cm nella quale è possibile posizionare i dosimetri di interesse avendo cura di riempire opportunamente con altro politene la cavità per evitare regioni di vuoto che andrebbero a perturbare il campo di radiazione.

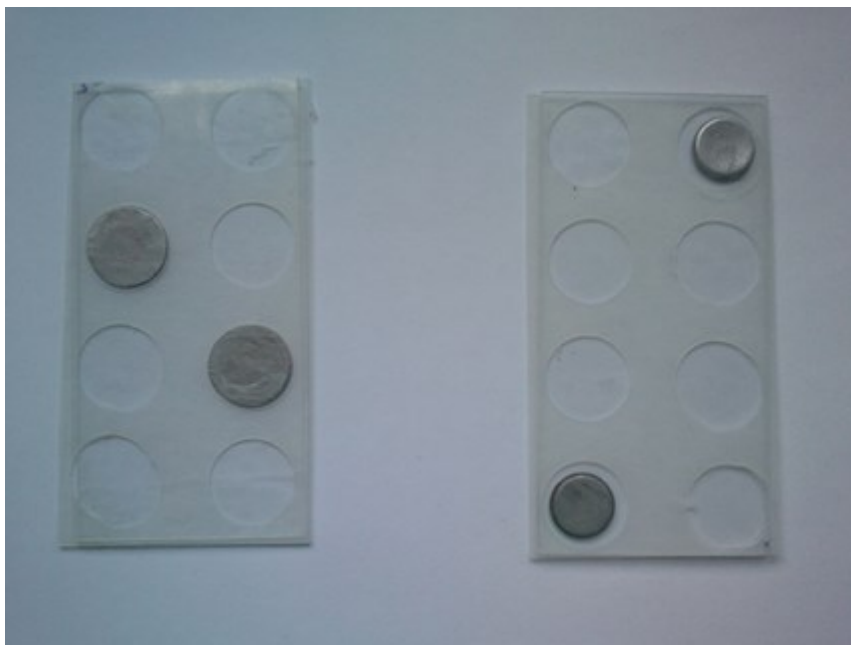
Per disporre i foglietti di Indio in posizioni note è stato utilizzato un supporto di polietilene costituito da tre strati rettangolari da 12 x 6 cm<sup>2</sup> e dello spessore di 1 mm. Nello strato centrale sono stati fatti otto fori di 2 cm di diametro necessari per contenere le schermature di Cadmio. Durante gli

irraggiamenti le posizioni non utilizzate sono state riempite con foglietti di polietilene per minimizzare la perturbazione del trasporto neutronico.

Nelle figure 12 e 13 sono mostrati rispettivamente i foglietti senza Cadmio e con Cadmio inseriti nei relativi supporti.



*Figura 12: Foglietti senza Cadmio*



*Figura 13: Foglietti schermati con Cadmio*

I foglietti sono stati posizionati nel centro di ogni singolo foro e bloccati utilizzando del Parafilm<sup>®</sup>M. Tali supporti sono stati poi inseriti nel fantoccio facendo attenzione che fossero posizionati nel piano passante per l'asse del fantoccio. Tutti gli spazi vuoti rimanenti sono stati riempiti con fogli del

medesimo materiale per evitare che vi fossero dei vuoti intorno ai punti di misura che causassero perturbazioni indesiderate del trasporto neutronico e avendo cura di mantenere il supporto centrato.

In figura 14 sono mostrate le operazioni di inserimento dei campioni in fantoccio.



*Figura 14: Inserimento supporto con foglietti in fantoccio*

I foglietti di Indio senza Cadmio sono stati irraggiati tutti in un singolo irraggiamento mentre i foglietti schermati con Cadmio sono stati irraggiati in due irraggiamenti distinti per evitare che il campo di neutroni fosse troppo perturbato dalla presenza di Cadmio. Per motivi di tempo non è stato possibile irraggiare singolarmente i foglietti schermati con Cadmio. Sono stati quindi fatti irraggiamenti di due foglietti alla volta schermati e la scelta delle posizioni è stata fatta con considerazioni sia relative alla eventuale reciproca perturbazione sia alle tempistiche di analisi considerando il fatto che le analisi dovevano esser fatte nello stesso giorno ma entro gli orari disponibili presso la struttura del centro di ricerca.

Sia i foglietti nudi che quelli incamiciati sono stati irraggiati per 20 minuti.

#### SUPPORTO SOTTILE:

Anche per questa configurazione sono state fatte misure con lo stesso obiettivo di valutare il rateo di fluenza termica.

Sono stati fatti due irraggiamenti, uno con foglietti nudi e uno con foglietti schermati con Cadmio.

Sono stati utilizzati tre foglietti di Indio senza Cadmio e tre foglietti di Indio schermati con Cadmio.

Il supporto utilizzato era costituito da due stecche di polistirene di dimensioni  $16 \times 2 \times 0.1 \text{ cm}^3$ . I foglietti sono stati posizionati fra le due stecche a distanza di 3.5 cm l'uno dall'altro e affrancati con Parafilm®M.

Questa struttura è stata poi posizionata lungo un diametro del collimatore della colonna in modo che il foglietto centrale si trovasse sull'asse del fascio.

Anche in questa configurazione i foglietti con e senza Cadmio sono stati irraggiati per 20 minuti.

Per tutti gli irraggiamenti sia in fantoccio che in supporto sottile sono stati registrati con la massima precisione possibile i tempi di inizio e fine irraggiamento e i tempi di inizio e fine misura necessari per l'elaborazione dei dati.

### 3.2 Metodo di analisi

La misura dell'attività è stata eseguita in loco con una strumentazione costituita da uno scintillatore di ioduro di sodio applicato a un fotomoltiplicatore a sua volta associato a un analizzatore multicanale. Il segnale in uscita è stato poi processato da un computer tramite il programma MAESTRO.

In figura 15 è mostrata la strumentazione con cui si sono stati analizzati i foglietti di attivazione.

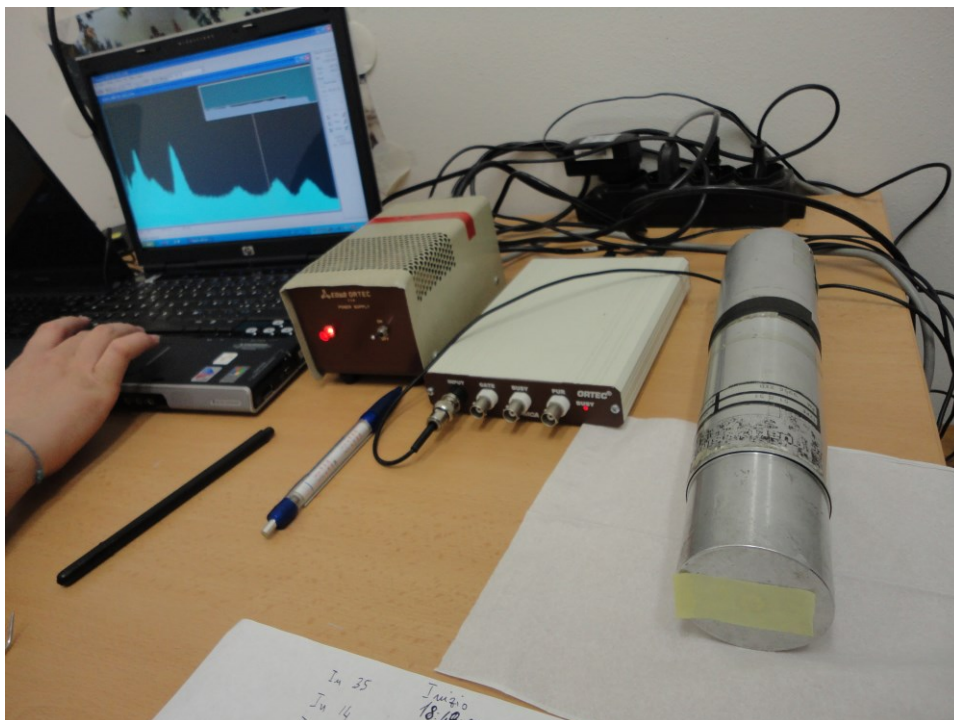


Figura 15: Strumentazione di analisi dei foglietti

Per ricavare i ratei di fluena termica sono stati elaborati i dati di attività ottenuti, utilizzando un programma sviluppato per esperimenti precedenti il quale si basa sul metodo standard di analisi di attivazione introducendo valutazioni sulle incertezze.

### 3.3 RISULTATI

IN FANTOCCIO:

I risultati ottenuti in seguito alle analisi sopra descritte relativamente agli irraggiamenti eseguiti in fantoccio di polietilene sono riportati in tabella 5 e rappresentati in figura 16.

Ratei di fluena in Fantoccio			
Coppia foglietti	Distanza dall'asse [cm]	Rateo d fluena termica [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Rateo di fluena epitermica [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
34; 48	1.50	2.55E+08	2.68E+08
74; 46	4.60	2.04E+08	4.73E+07
75; 52	7.70	5.15E+07	9.04E+06
35; 73	10.80	2.07E+07	2.96E+06

Tabella 5: Ratei di fluena in fantoccio di polietilene

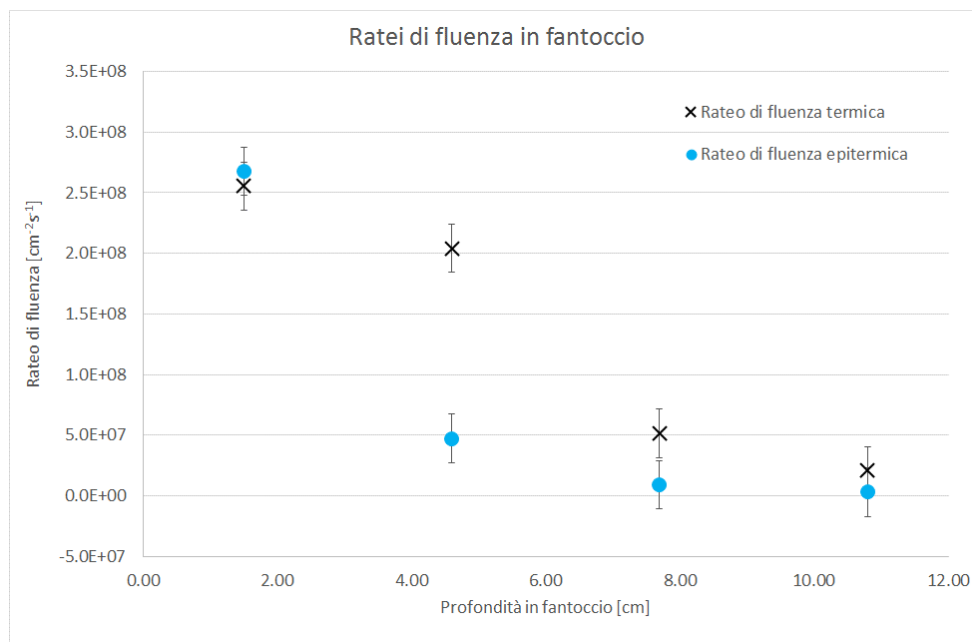


Figura 16: Rateo di fluena in funzione delle profondità in fantoccio di polietilene

Gli andamenti ottenuti sia per la fluena termica che epitermica sono ragionevoli, infatti l'andamento della fluena termica ottenuta rispecchia l'andamento tipicamente ottenuto per la fluena termica in fantocci tessuto equivalenti irraggiamenti con fasci epitermici che presenta un massimo nell'intorno di 2 cm.

La fluena di neutroni epitermici ovviamente diminuisce in profondità con andamento approssimativamente esponenziale.

IN ARIA IN SUPPORTO SOTTILE:

I risultati ottenuti in seguito alle analisi sopra descritte relativamente agli irraggiamenti eseguiti in supporto sottile di polistirene sono riportati in tabella 6 e rappresentati in figura 17.

Ratei di fluenza in Aria			
Coppia foglietti	Distanza dall'asse [cm]	Rateo di fluenza di neutroni termici [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Rateo di fluenza di neutroni epitermici [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
47; 60	-3.50	3.07E+07	1.28E+08
35; 36	0.00	3.21E+07	1.45E+08
77; 43	3.50	2.68E+07	1.34E+08

Tabella 6: Ratei di fluenza in supporto SOTTILE di polistirene

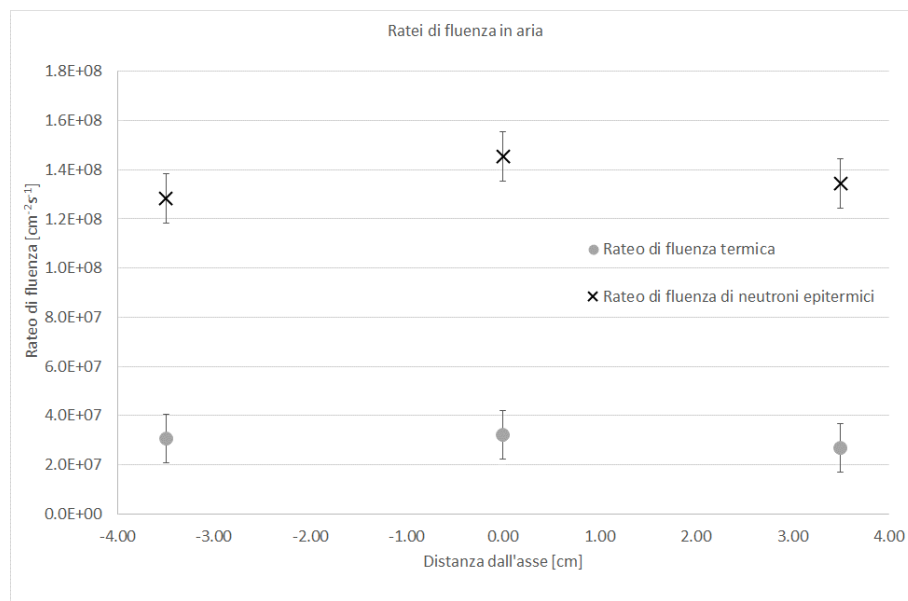


Figura 17: Profilo trasversale di rateo di fluenza in supporto SOTTILE di polistirene

Il supporto è stato posto trasversalmente al fascio lungo un diametro orizzontale, i risultati confermano una buona simmetria del fascio nel piano orizzontale.

## 4. Misure al reattore LVR-15 con TLD di LiF

Sono state effettuate misure in aria e in fantoccio presso due colonne orizzontali del reattore nucleare da ricerca LVR-15 del *Research Centre Řež* (Repubblica Ceca). Le caratteristiche di questo reattore saranno presentate in appendice. Una delle colonne in cui son state fatte le misure è la colonna epitermica progettata per trattamenti di *Boron Neutron Captur Therapy* (BNCT) che è un tipo di radioterapia in fase sperimentale che utilizza neutroni termici sfruttando l'elevata sezione d'urto dell'isotopo  $^{10}\text{B}$ . Alcuni irraggiamenti son stati fatti col fascio epitermico di questa colonna, che chiameremo BNCT, e altri sono stati fatti presso la stessa colonna con il fascio moderato da un disco di 2 cm di polietilene che viene utilizzato negli esperimenti biologici per irraggiare campioni di piccole dimensioni quali topi di 5 giorni o colture cellulari. L'uscita del collimatore è circolare con un diametro di 12 cm. L'altra colonna in cui son state fatte misure è la colonna orizzontale termica HK1 il cui collimatore è circolare con un diametro di 10 cm.

Per valutare i profili dei campi di radiazione in termini di rateo di dose gamma e rateo di fluena termica sono stati utilizzati dosimetri TLD-700 e TLD-100 per le misure in aria e solo TLD-700 in fantoccio.

La dose gamma e la fluena termica sono state ottenute applicando, per ogni singolo dosimetro, l'algoritmo basato sulla forma delle GC descritto nel capitolo 2.

### 4.1 IRRAGGIAMENTI IN ARIA

Abbiamo irraggiato tali dosimetri in diverse configurazioni sia nella colonna BNCT che nella colonna HK1.

- Per la caratterizzazione del fascio epitermico della colonna BNCT moderato con 2 cm di polietilene e per la caratterizzazione del fascio termico della colonna HK1 sono stati irraggiati TLD-700 e TLD-100 inseriti tra due sottili stecche di polistirene (supporto SOTTILE) disposti trasversalmente all'asse del fascio lungo il diametro orizzontale della bocca del collimatore.
- Sono stati irraggiati TLD-700 e TLD-100 inseriti nei supporti utilizzati, nella stessa campagna di misure, per irraggiamenti con l'alanina, per valutare l'effetto perturbativo sul campo di radiazione da parte di tale supporto e confrontare i risultati ottenuti da tali dosimetri con i



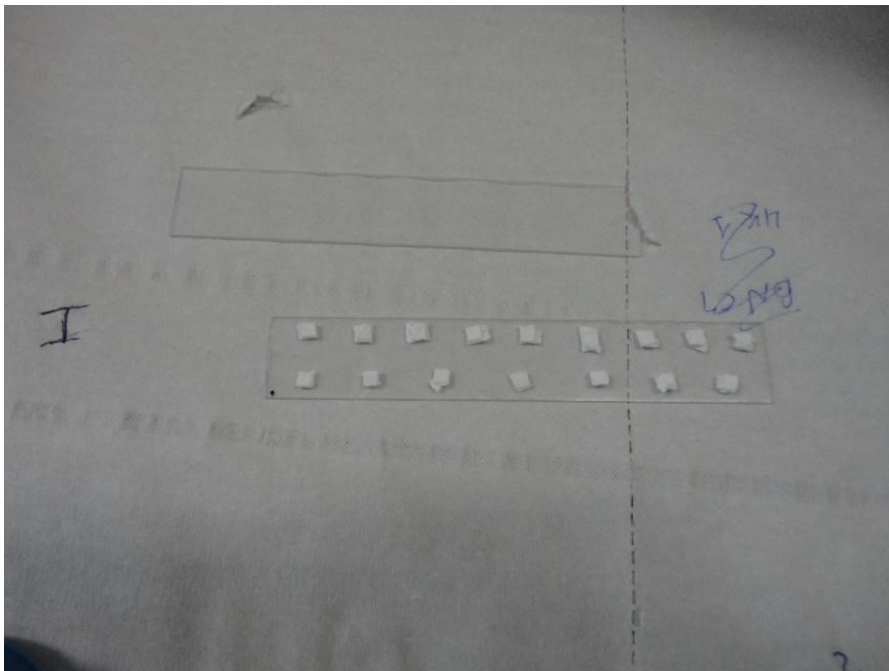
risultati che verranno ottenuti da dosimetri di alanina. La descrizione del supporto e i risultati ottenuti saranno riportati nel capitolo 6.

- Sono stati irraggiati TLD TLD-700 in colonna BNCT immersi in strutture che imitano dosimetri a gel, per valutare l'eventuale effetto perturbativo sul campo di radiazione provocato dai materiali costituenti tale dosimetro. La descrizione del supporto e i risultati ottenuti saranno riportati nel capitolo 5.

#### SUPPORTO SOTTILE:

Si sono posizionati i dosimetri fra due stecche di polistirene trasparente di dimensioni  $13 \times 2 \times 0.1 \text{ cm}^3$ ; dopo averli ricoperti uno ad uno con del nastro di Teflon e collocati al centro della barretta ad una distanza di 1 cm l'uno dall'altro per i TLD-700 e di 1.5 cm per i TLD-100. Il tutto è stato ricoperto con del Parafilm<sup>®</sup>M in modo tale da evitare il distacco o lo spostamento dei dosimetri.

In figura 18 sono mostrati i TLD disposti su uno strato di polistirene durante le operazioni di assemblamento.



*Figura 18: Preparazione della configurazione SOTTILE per TLD-700*

I TLD-700 in questa configurazione sono stati irraggiati per 14.44 minuti nella colonna BNCT e per circa 30 minuti nella colonna HK1, mentre i TLD-100 sono stati irraggiati per 3.80 minuti nella colonna BNCT e per circa 4 minuti nella colonna HK1.

## 4.2 IRRAGGIAMENTI IN FANTOCCIO

Sono anche state fatte misure in fantoccio irraggiato con il fascio epitermico della colonna BNCT. In queste misure sono stati utilizzati solo TLD-700 dato che si era constatato, nelle misure in aria, che i TLD-100 risultano inaffidabili nell'applicazione del metodo di separazione utilizzato in condizioni di campo di radiazioni come quelli delle colonne utilizzate ovvero con entità di rateo dose gamma rispetto al rateo di fluenza termica simili a quelli presenti in tali colonne.

Sono stati utilizzati 12 TLD-700 disposti in una matrice di tre colonne e quattro righe in un supporto di polietilene di misure  $6 \times 12 \times 0.3 \text{ cm}^3$ . Il supporto è stato posizionato nel fantoccio in modo che la colonna centrale coincida con l'asse del fascio, le altre due colonne distano 2 cm da questa. I fori delle quattro righe sono a profondità di 1.5 cm, 4.5 cm, 7.5 cm e 10.5 cm rispetto al lato del supporto posto contro la bocca del collimatore.

Nella figura 19 sono visibili le operazioni di inserimento dei TLD nel supporto.



*Figura 19: Inserimento TLD in supporto per fantoccio*

Tali TLD-700 sono stati fissati al supporto utilizzando del Parafilm®M.

Tale struttura è stata poi inserita nel fantoccio descritto nel capitolo 3 in modo che fossero posizionati nel piano passante per l'asse della colonna e centrati rispetto ad esso. Per evitare che il telaio non subisse spostamenti e per evitare perturbazioni al campo di radiazione sono stati riempiti i vuoti con del polietilene.

In figura 20 è mostrato il fantoccio pronto per l'irraggiamento.

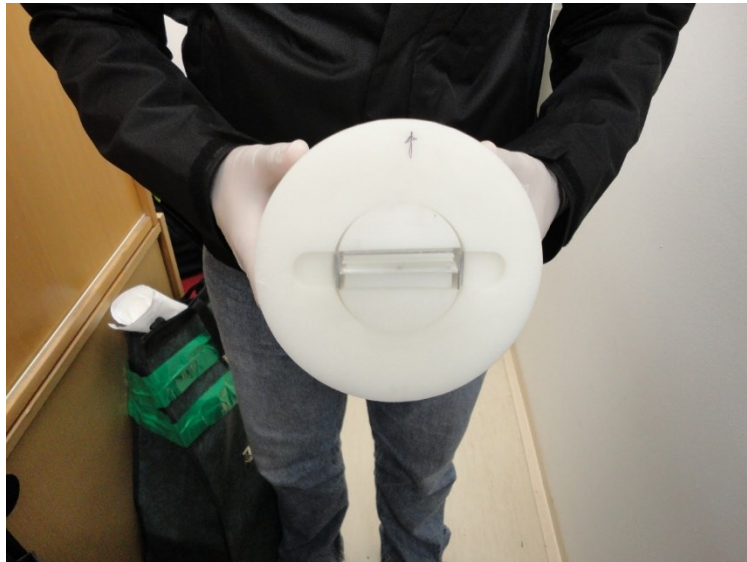


Figura 20: Fantoccio con dosimetri TLD pronto all'irraggiamento

In questa configurazione i dosimetri sono stati irraggiati per 30 minuti.

## 4.3 RISULTATI DELLE MISURE IN ARIA

### 4.3.1 TLD-700:

- DOSE GAMMA

I ratei di dose ottenuti con TLD-700 in supporto SOTTILE sono riportati nelle tabelle 7 e 8 rispettivamente relative al fascio epitermico moderato con 2 cm di polietilene della colonna BNCT e quello termico della colonna HK1

TLD-700 SUPPORTO SOTTILE COLONNA BNCT		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma per 10000 cont/s [Gyh-1]
A2	-6	0.85
A3	-5	1.58
A4	-4	2.47
A5	-3	2.75
A6	-2	2.69
A7	-1	2.78
A8	0	2.74
A9	1	2.73
B1	2	2.86
B2	3	2.91
B3	4	2.58
B4	5	2.43
B5	6	1.25

Tabella 7: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

TLD-700 SUPPORTO SOTTILE COLONNA HK1		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma [Gyh-1]
B6	-6	0.11
B7	-5	0.13
B8	-4	0.36
B9	-3	0.40
C1	-2	0.37
C2	-1	0.41
C3	0	0.35
C4	1	0.38
C6	2	0.42
C7	3	0.37
C8	4	0.37
C9	5	0.26
D1	6	0.12

Tabella 8: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

Nelle figure 21 e 22 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per le due colonne.

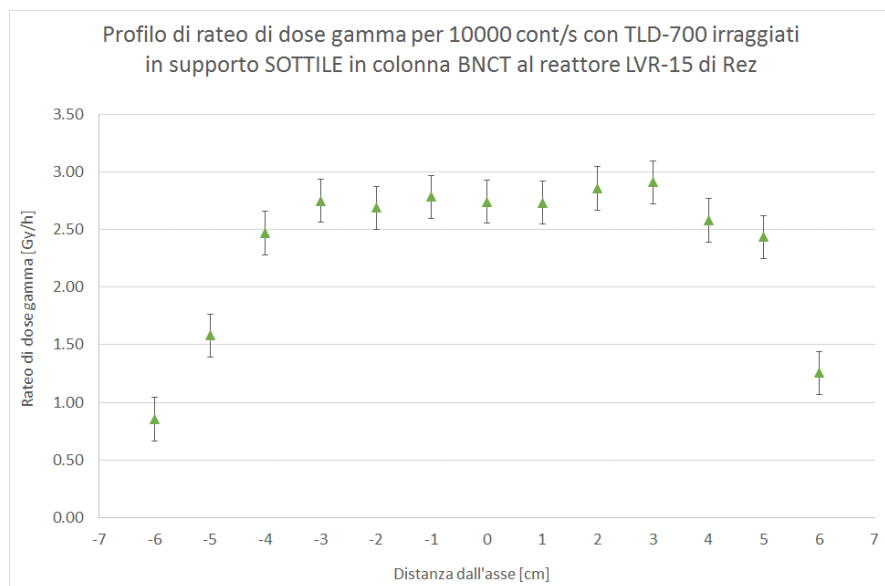


Figura 21: Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dei TLD-700 dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT, nella configurazione supporto SOTTILE

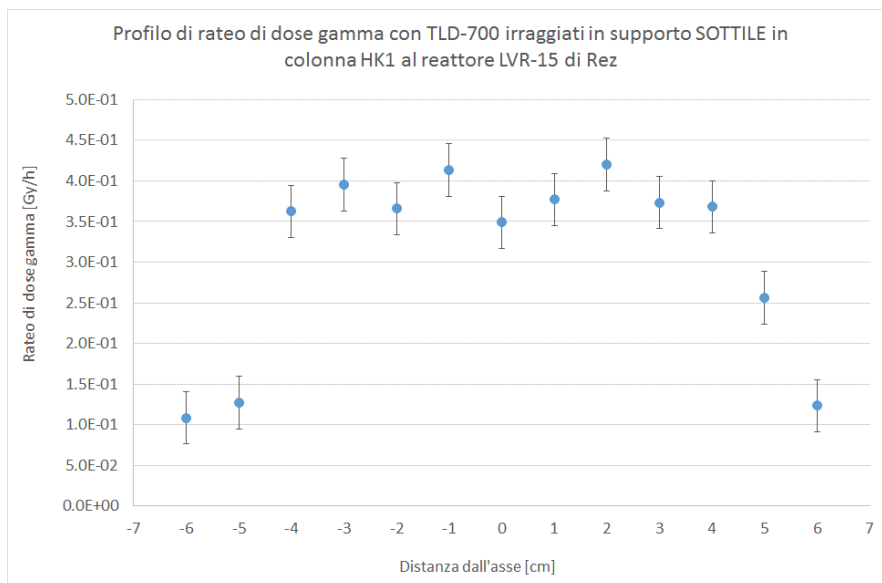


Figura 22: Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

- **FLUENZA DI NEUTRONI TERMICI:**

Di seguito sono riportate le fluenze termiche in unità arbitrarie ottenute con TLD-700 in supporto SOTTILE. Nelle tabelle 9 e 10 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente nella colonna BNCT e nella colonna HK1

TLD-700 SUPPORTO SOTTILE COLONNA BNCT			
TLD	Distanza dall'asse [cm]	h2 neutroni	h2 Rez
A2	-6	4.25E+04	6.07E+04
A3	-5	5.81E+04	8.94E+04
A4	-4	6.80E+04	1.19E+05
A5	-3	1.18E+05	1.78E+05
A6	-2	1.40E+05	2.01E+05
A7	-1	1.30E+05	1.83E+05
A8	0	1.63E+05	2.24E+05
A9	1	1.53E+05	2.14E+05
B1	2	1.31E+05	1.93E+05
B2	3	1.42E+05	2.12E+05
B3	4	1.29E+05	1.79E+05
B4	5	6.46E+04	1.12E+05
B5	6	5.68E+04	8.15E+04

Tabella 9: Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

TLD-700 SUPPORTO SOTTILE COLONNA HK1			
TLD	Distanza dall'asse [cm]	h2 neutroni	h2 Rez
B6	-6	4.56E+03	1.20E+04
B7	-5	1.33E+04	2.12E+04
B8	-4	4.02E+05	4.26E+05
B9	-3	5.20E+05	5.51E+05
C1	-2	5.90E+05	6.16E+05
C2	-1	5.57E+05	5.85E+05
C3	0	6.19E+05	6.45E+05
C4	1	5.95E+05	6.22E+05
C6	2	5.72E+05	6.00E+05
C7	3	5.73E+05	6.00E+05
C8	4	4.66E+05	4.91E+05
C9	5	2.74E+05	2.92E+05
D1	6	9.41E+03	1.73E+04

Tabella 10: Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

Nelle figure 23 e 24 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per la colonna BNCT e per la colonna HK1.

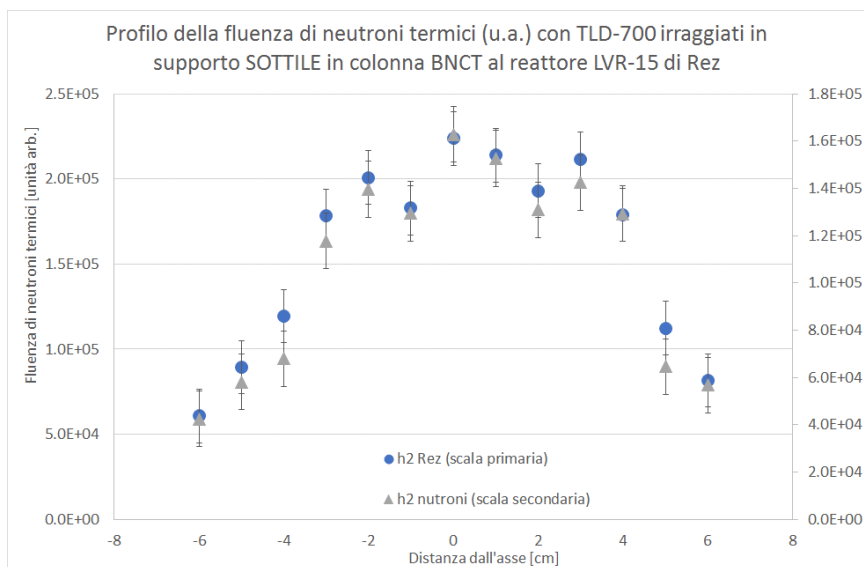


Figura 23: Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

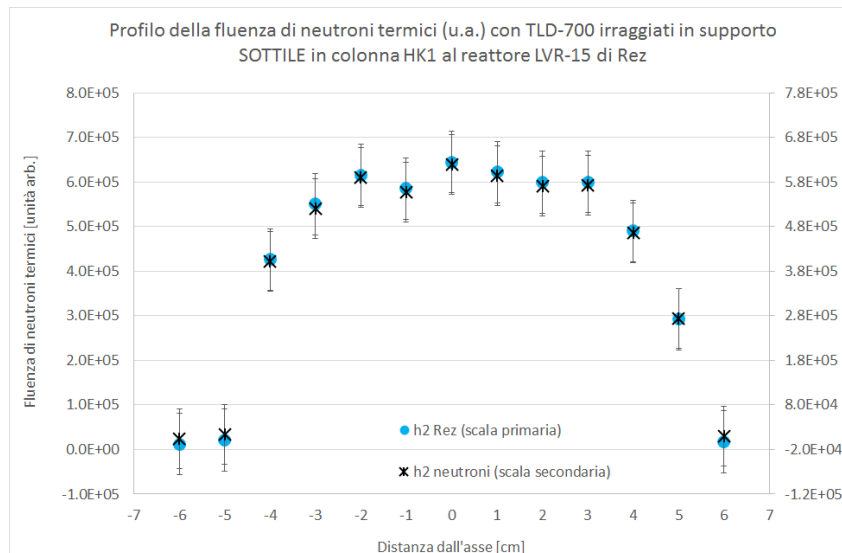


Figura 24: Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto SOTTILE

A supporto dei risultati ottenuti sono state fatte delle verifiche sui contributi relativi della radiazione gamma e dei neutroni termici nella risposta dei dosimetri. Ad esempio considerando un TLD-700 collocato nella regione centrale del fascio i contributi della dose gamma e della dose dovuta ai neutroni termici sull'altezza del primo picco dosimetrico sono rispettivamente del 57% e del 43%. Questo conferma, che nel caso dei dosimetri TLD-700, non ci si trova nelle condizioni di inaffidabilità descritte sopra.

#### 4.3.2 TLD-100:

Per quanto riguarda i TLD-100 ci si aspetta che questi forniscano dati inaffidabili per quanto riguarda la dose gamma in quanto presentano un contenuto di  $^6\text{Li}$  molto maggiore rispetto ai TLD-700 per cui la dose gamma risulta essere molto piccola rispetto alla dose assorbita dal dosimetro stesso a causa dei neutroni termici e quindi non sono utilizzabili le relazioni (3) e (4).

I TLD-100 potrebbero quindi essere utilizzati in queste condizioni di campo di radiazione solo per valutare la fluenza termica facendo però attenzione a non superare il valore limite di fluenza termica oltre il quale si verifica una riduzione della sensibilità dei dosimetri; in tal caso i valori di dose e fluenza valutati risulterebbero sottostimati e inoltre i dosimetri potrebbero aver subito danno da radiazione e sarebbero quindi inutilizzabili per successive misure se non previa una nuova calibrazione.

Dai risultati delle misure riportati di seguito si può verificare che come previsto la dose gamma non è valutabile con questi dosimetri.

- **DOSE GAMMA:**

Di seguito sono riportati i ratei di dose ottenuti con TLD-100 in supporto SOTTILE applicando la relazione (3). Nelle tabelle 11 e 12 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente nella colonna BNCT e nella colonna HK1.

TLD-100 SUPPORTO SOTTILE COLONNA BNCT		
TLD	distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma per 10000 cont/s [Gy/h]
b2	-6.00	6.08
b3	-4.80	7.10
b4	-3.60	8.20
b5	-2.40	5.66
b6	-1.20	4.65
b7	0.00	5.45
b8	1.20	6.37
b9	2.40	2.62
g1	3.60	-1.51
g2	4.80	2.31
g3	6.00	4.66

Tabella 11: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

TLD-100 SUPPORTO SOTTILE COLONNA HK1		
TLD	Distanza dall'asse della colonna [cm]	Rateo di dose gamma [Gyh-1]
a1	-6.00	0.38
a2	-4.67	1.86
a3	-3.33	-12.41
a4	-2.00	-13.45
a5	-0.67	-29.46
a6	0.67	-21.52
a7	2.00	-31.47
a8	3.33	-11.42
a9	4.67	-17.91
b1	6.00	0.66

Tabella 12: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

I risultati riportati nelle tabelle sono facilmente interpretabili confrontando la dose che i TLD-100 risultano aver preso durante gli irraggiamenti con la dose gamma rispettivamente nelle due colonne. In entrambe le colonne i TLD-100 sono stati irraggiati per 4 minuti. Valutando una dose *gamma-equivalente* definita come dose ottenuta dal rapporto fra l'altezza del primo picco della GC misurata e l'altezza del primo picco della GC di calibrazione (per Gy) si deduce che la dose effettivamente assorbita dai TLD-100 nella regione centrale del collimatore equivale a 3.0 Gy nella colonna BNCT e a 8.9 Gy nella colonna HK1. La dose gamma assorbita durante i 4 minuti



dell'irraggiamento, dedotta dai risultati dei TLD 700, è pari a 0.1 Gy e 0.03 Gy rispettivamente nelle due colonne. Da questi dati si deduce quindi che nel caso degli irraggiamenti con il fascio moderato della colonna BNCT la dose gamma risulta essere circa il 3% della dose totale *gamma-equivalente* e nel caso della HK1 la dose gamma è solo circa 0.3% della dose totale *gamma-equivalente* assorbita da dosimetro.

In entrambi i casi quindi il contributo della dose gamma è inferiore all'errore di misura dei dosimetri come previsto. Nella colonna HK1 il contributo gamma è talmente piccolo che i risultati ottenuti sono addirittura negativi; nella colonna BNCT i risultati sono positivi però inaccettabili in quanto presentano comunque un errore circa del 200%.

Nelle figure 25 e 26 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle 11 e 12 rispettivamente per la colonna BNCT e per la colonna HK1. Per confronto sono stati inseriti anche i risultati ottenuti con i TLD-700.

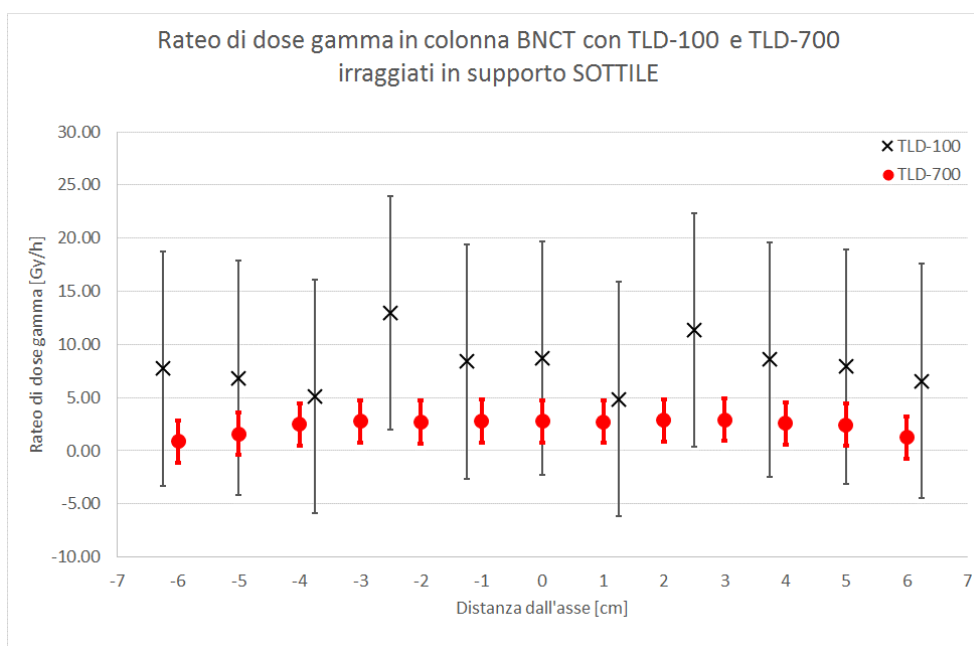


Figura 25: Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

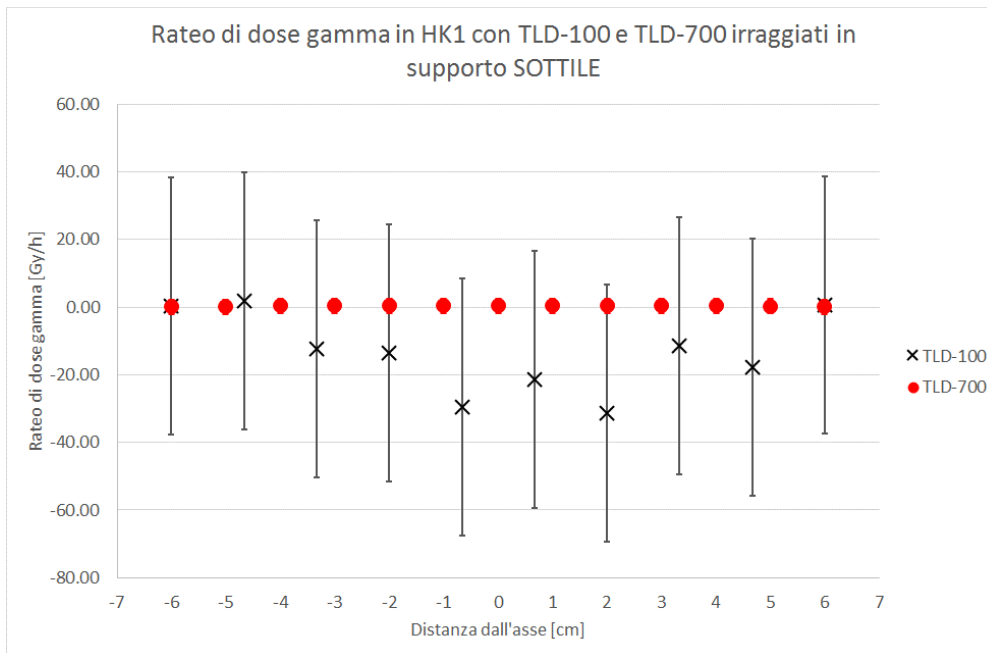


Figura 26: Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE (l'errore dei valori ottenuti dei TLD-700 è compreso nelle dimensioni del punto)

Nella figura 27 è riportato un esempio dei risultati che si ottengono applicando il metodo di separazione, descritto nel capitolo 2, ai TLD-100.

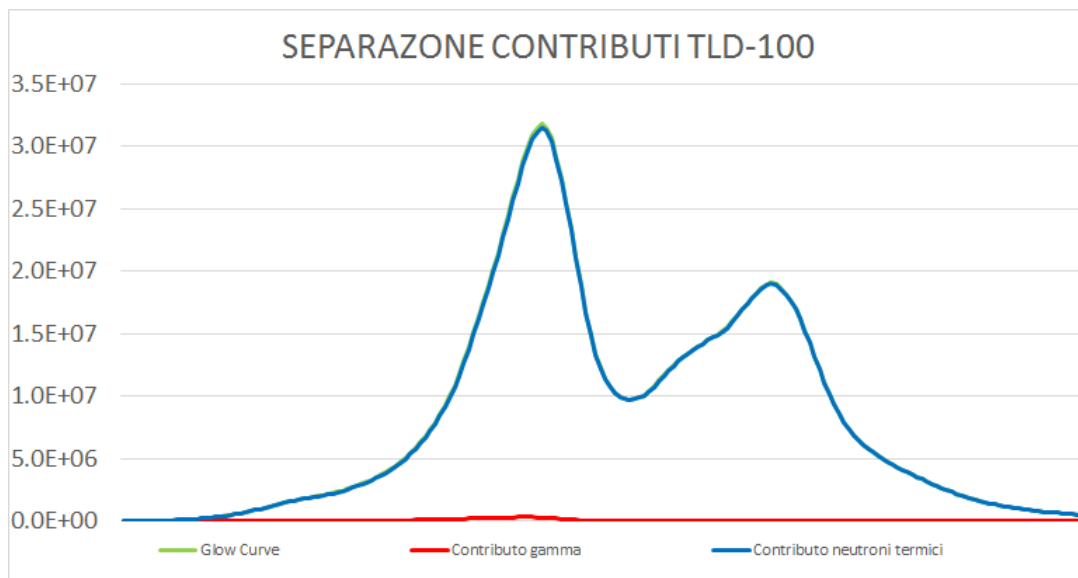


Figura 27: Separazione dei contributi da un TLD-100 irraggiato in HK1

E' evidente l'inconsistenza dell'applicazione del metodo in condizioni in cui i contributi dovuti ai neutroni termici e alla componente gamma sono così disparati.

- *FLUENZA DI NEUTRONI TERMICI*

Riguardo ai TLD-100 è stato fatto uno studio per valutare quale parametro della GC possa essere adeguato alla determinazione della fluenza termica in un campo misto n- $\gamma$  quale quello del presente esperimento. Considerando la figura 27 si può notare come in tali condizioni di irraggiamento il contributo della dose gamma alla risposta del TLD-100 risulta essere del tutto trascurabile per quanto riguarda il secondo picco. Di conseguenza si può considerare il secondo picco della GC misurata in seguito agli irraggiamenti come dovuto al solo contributo dei neutroni termici alla risposta del dosimetro. E' stato quindi scelto come parametro significativo il secondo picco della GC relativa agli irraggiamenti al reattore per la valutazione della fluenza termica. Tale parametro è stato indicato come *h2 Rez*.

Di seguito sono riportate le fluenze termiche in unità arbitrarie ottenute con TLD-100 in supporto SOTTILE. Nelle tabelle 13 e 14 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente nella colonna BNCT e nella colonna HK1

<b>TLD-100 SUPPORTO SOTTILE COLONNA BNCT</b>		
<b>TLD</b>	<b>distanza dall'asse [cm]</b>	<b>h2 Rez</b>
b2	-6.00	1.80E+06
b3	-4.80	3.04E+06
b4	-3.60	4.60E+06
b5	-2.40	5.27E+06
b6	-1.20	6.43E+06
b7	0.00	6.67E+06
b8	1.20	6.22E+06
b9	2.40	6.19E+06
g1	3.60	5.16E+06
g2	4.80	4.08E+06
g3	6.00	2.06E+06

*Tabella 13: Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE*

TLD-100 SUPPORTO SOTTILE COLONNA HK1		
TLD	Distanza dall'asse della colonna [cm]	h2 Rez
a1	-6.00	1.52E+05
a2	-4.67	1.11E+06
a3	-3.33	2.20E+07
a4	-2.00	2.31E+07
a5	-0.67	2.65E+07
a6	0.67	2.67E+07
a7	2.00	2.66E+07
a8	3.33	2.26E+07
a9	4.67	2.08E+07
b1	6.00	3.84E+05

Tabella 14: Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

Nelle figure 28 e 29 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per la colonna BNCT e per la colonna HK1.

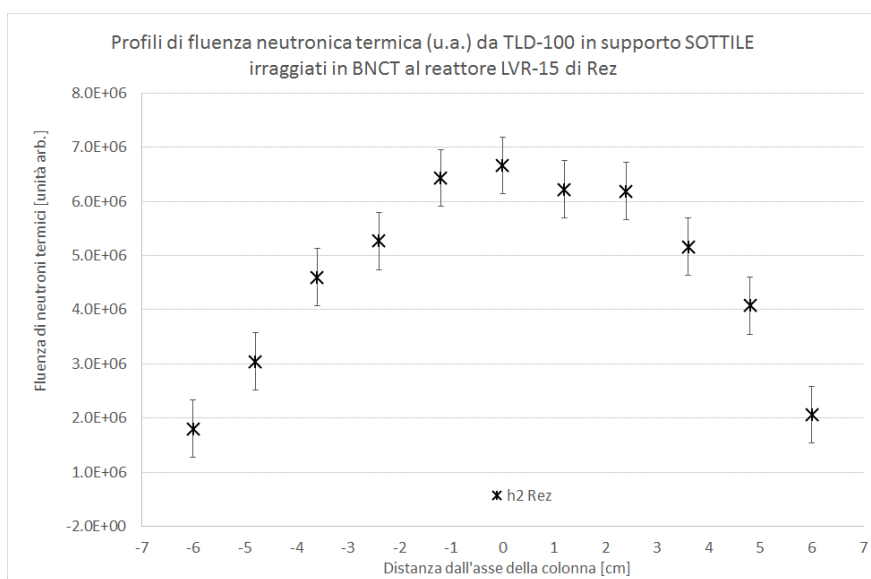


Figura 28: Profilo del rateo di fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

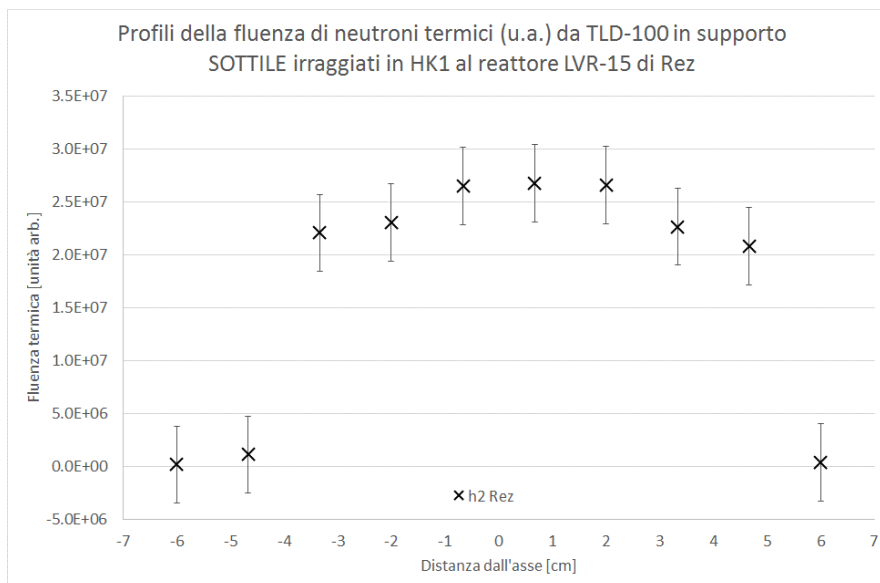


Figura 29: Profilo della fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-100 nel supporto SOTTILE

Questi dosimetri si sono dimostrati quindi inaffidabili per valutare la dose gamma e ricavare profili trasversali di rateo di dose in fasci come quelli utilizzati in questo esperimento ma potrebbero essere promettenti, sempre in condizioni di campo di radiazione con queste caratteristiche, per valutare la fluenza termica previa una adeguata calibrazione ai neutroni termici. È importante osservare che in altri fasci da reattore ove il rapporto relativo tra radiazione gamma e neutroni termici dovesse essere maggiore, il metodo proposto che utilizza le relazioni (3) e (4) potrebbe essere applicato anche ai TLD-100 permettendo quindi di misurare con solo questo tipo di dosimetri sia la dose gamma che la fluenza termica.

#### 4.4 RISULTATI DELLE MISURE IN FANTOCCIO:

- **DOSE GAMMA:**

Nella tabella 15 sono riportati i ratei di dose gamma ottenuti con TLD-700 in fantoccio irradiato col fascio epitermico della colonna BNCT.

Rateo di dose gamma in funzione della profondità in fantoccio misurata con TLD-700 in colonna BNCT				
Profondità [cm]	Rateo di dose gamma 1 [Gy/h]	Rateo di dose gamma 2 [Gy/h]	Rateo di dose gamma 3 [Gy/h]	Rateo di dose gamma medio [Gy/h]
1.2	5.25	4.67	4.83	4.91
4.2	4.75	4.45	4.23	4.48
7.2	2.85	3.06	3.04	2.98
10.2	1.82	2.08	1.88	1.93

Tabella 15: Rateo di dose gamma ottenuta da TLD-700, in funzione della profondità in fantoccio

Nella figura 30 è rappresentata, per ogni profondità, la media dei risultati ottenuti con i diversi TLD. È stata fatta una media tra i tra TLD posti alla stessa profondità in fantoccio in quanto la distanza a cui sono stati posti, per ogni profondità, è troppo piccola per poter apprezzare la differenza di rateo di dose gamma al di fuori dell'errore di misura che ha un gradiente spaziale molto piccolo.

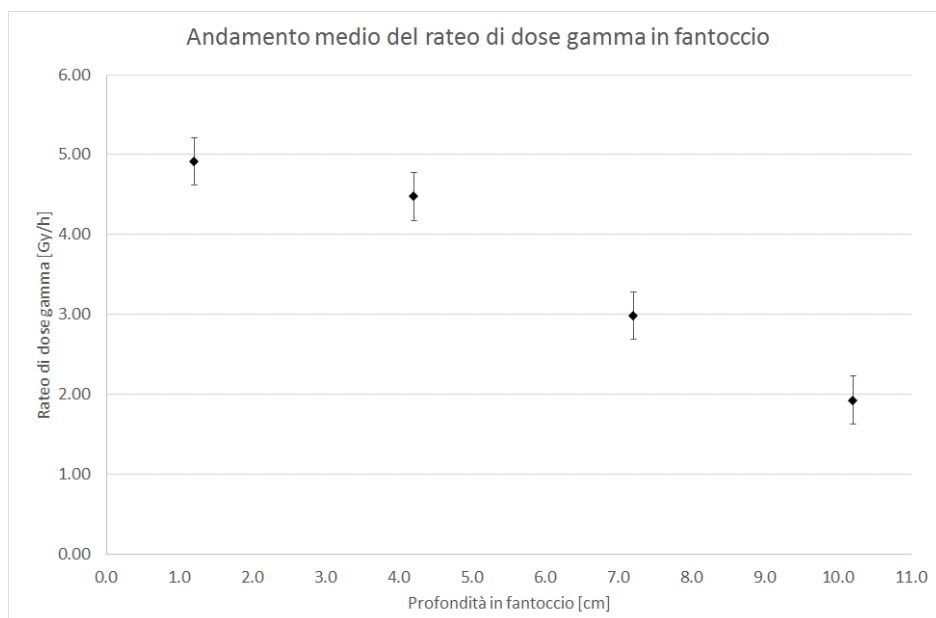


Figura 30: Andamento medio del rateo di dose gamma in funzione della profondità in fantoccio da TLD-700

L'andamento ottenuto per il rateo di dose gamma è consistente, infatti è l'andamento tipicamente ottenuto per la dose gamma in fantocci di acqua o di materiali tessuto equivalenti irraggiamenti con fasci epidermici che presenta un massimo nell'intorno di 2-3 cm.

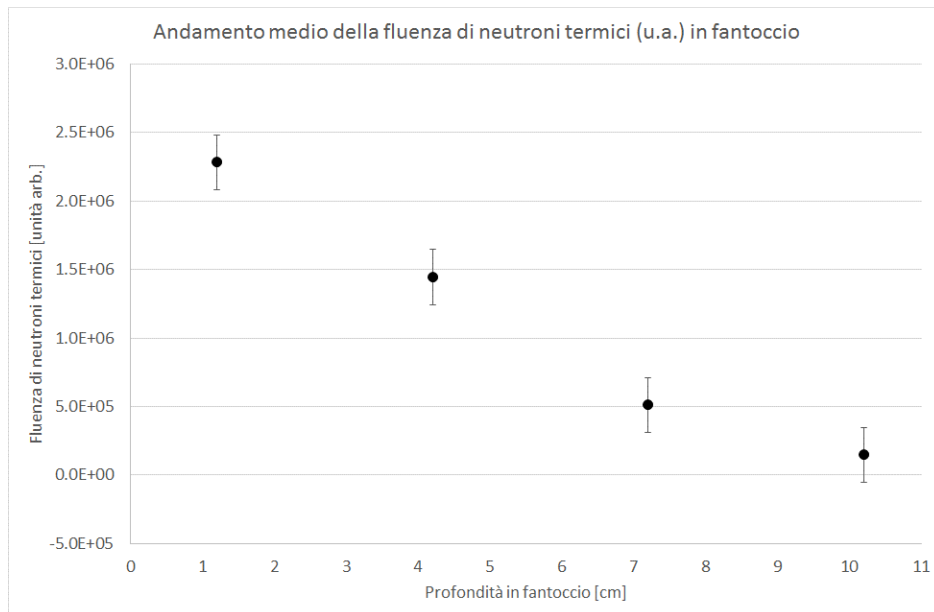
- **FLUENZA DI NEUTRONI TERMICI:**

Nella tabella 16 è riportata la fluena termica in unità arbitrarie ottenuta con TLD-700 in funzione della profondità in fantoccio di polietilene irraggiato col fascio epidermico della colonna BNCT.

Andamento della fluena termica (u.a.) in funzione della profondità in fantoccio misurata con TLD-700 in colonna BNCT				
Profondità [cm]	h2_1	h2_2	h2_3	h2 MEDIO
1.2	2.07E+06	2.53E+06	2.25E+06	2.28E+06
4.2	1.16E+06	1.57E+06	1.60E+06	1.44E+06
7.2	4.63E+05	5.43E+05	5.31E+05	5.12E+05
10.2	1.32E+05	1.46E+05	1.61E+05	1.47E+05

Tabella 16: Fluena termica in unità arbitrarie ottenuta da TLD-700, in funzione della profondità in fantoccio

Nella figura 31 è rappresentata, per ogni profondità, la media dei risultati ottenuti con i diversi TLD. Anche in questo caso si è rappresentata la media dei diversi TLD alla stessa profondità.



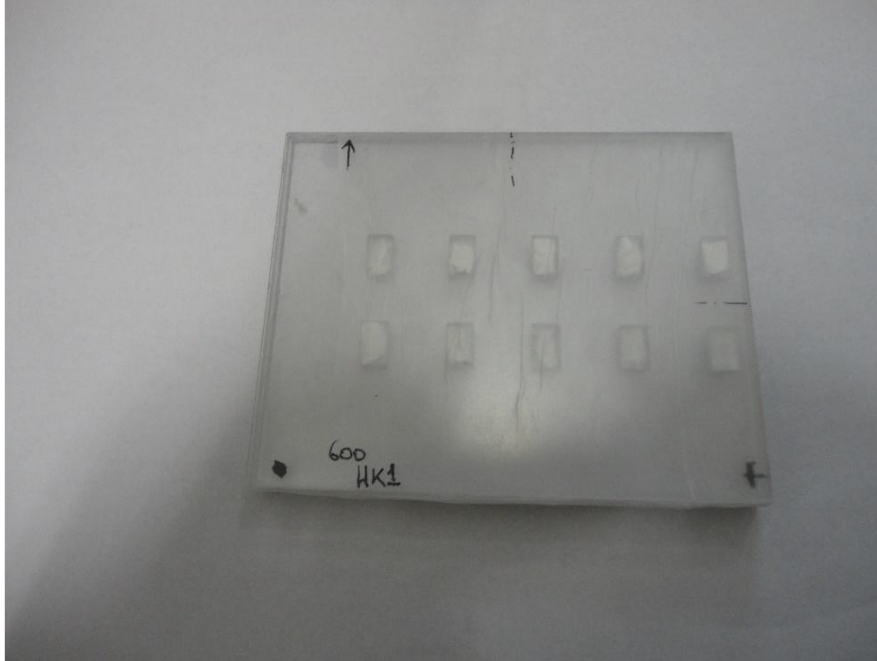
*Figura 31: Andamento medio della fluenza in unità arbitrarie in funzione della profondità in fantoccio da TLD-700*

Anche questo andamento è consistente, infatti è l'andamento tipicamente ottenuto per la fluenza termica in fantocci di acqua o di materiali tessuto equivalenti in irraggiamenti con fasci epitermici che presenta un massimo nell'intorno di 2 cm.

#### 4.5 TLD-600

L'irraggiamento di TLD-600 ha avuto lo scopo di determinare il rapporto  $R_n$  tra le altezze del primo e del secondo picco della GC ottenuta con irraggiamento con solo neutroni termici. Come spiegato precedentemente, nei campi di radiazione coinvolti nell'esperimento il contributo gamma è trascurabile nella risposta dei TLD-600 dove, a causa dell'elevato contenuto di  ${}^6\text{LiF}$ , la dose assorbita è praticamente dovuta ai soli neutroni termici. In tali condizioni si ottengono quindi GC utilizzabili per determinare il fattore  $R_n$  che deve essere utilizzato applicando la relazione (3) alla risposta dei TLD-700 in quanto, come già detto, questo rapporto a parità di parametri di analisi è con buona approssimazione uguale per ogni LiF:MgTi con qualunque percentuale di  ${}^6\text{LiF}$ . Tale rapporto è quindi stato inserito nella relazione (3) al fine di effettuare la separazione dei contributi (neutroni e gamma) nella GC misurata coi TLD-700 o TLD-100 come descritto nei paragrafi precedenti.

Sono stati irraggiati 5 dosimetri di TLD-600 posti in un supporto di polistirene con dimensioni  $10.2 \times 8 \times 0.4 \text{ cm}^3$  (mostrato nella figura 32) dopo avere ricoperto ogni singolo chip prima con del Teflon e successivamente con del Parafilm®M.



*Figura 32: TLD-600 nell'apposito supporto prima dell'irraggiamento nella HK1*

Tali dosimetri sono stati irraggiati per pochi secondi nella colonna HK1 (dove il rateo di fluenza termica è inferiore rispetto alla colonna BNCT), al fine di evitare il danneggiamento da radiazione. E' stato possibile fare un irraggiamento così breve nella colonna HK1, che non è dotata di *counter* che permette di normalizzare le fluenze data la variazione che queste hanno durante i tempi di apertura del fascio, in quanto per ottenere il rapporto  $R_n$  non è importante conoscere la fluenza a cui il dosimetro è stato irraggiato.

Nella figura 33 è mostrata una GC ottenuta con TLD-600.



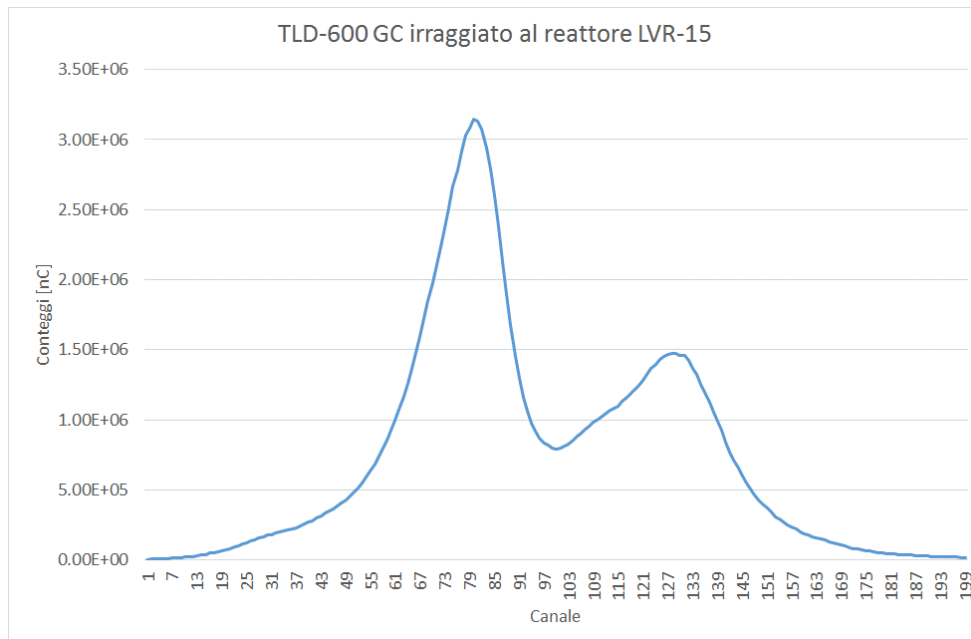


Figura 33: Esempio di GC per un TLD-600, irraggiato nella HK1

Per un problema tecnico con la strumentazione di analisi i dosimetri sono stati analizzati solo dopo le vacanze estive ovvero 15 settimane dopo l'irraggiamento. Sono state fatte opportune valutazioni per sottrarre la dose dovuta all'auto irraggiamento del dosimetro dovuto al decadimento del Trizio prodotto dalle reazioni  ${}^6\text{Li} (n,\alpha)\text{T}$ .

Il rapporto  $R_n$  trovato tra il primo e il secondo picco è di 1.7, compatibile con quello valutato in campagne di misura precedenti.

#### 4.6 CALIBRAZIONE AI NEUTRONI TERMICI DEI TLD-700

Dopo aver constatato l'affidabilità dei TLD-700 in queste condizioni di campo di radiazione si è ottenuto il coefficiente di calibrazione dei TLD-700 ai neutroni termici utilizzando i dati ottenuti dalle misure con i foglietti di attivazione.

Per poter attribuire correttamente ad ogni TLD il valore di fluensa termica dedotti dalle misure con i foglietti d'attivazione i TLD sono stati irraggiati con delle configurazioni che riproducevano il meglio possibile quelle degli irraggiamenti dei foglietti. Per quanto riguarda gli irraggiamenti lungo un diametro del fascio moderato della colonna BNCT i TLD-700 sono stati disposti in supporto SOTTILE costituito dalle stesse due stecche di polistirene dello spessore di 1 mm usate per le misure di attivazione. Per quanto riguarda gli irraggiamenti in fantoccio di polietilene irraggiato col fascio epitermico della colonna BNCT i TLD sono stati inseriti nel fantoccio entro un supporto come descritto nel paragrafo 4.2.

A causa della instabilità della potenza del reattore gli irraggiamenti non sono stati effettuati esattamente con la stessa potenza. Per poter confrontare i dati è stata fatta una normalizzazione. Questa operazione è stata eseguita utilizzando i ratei di conteggio registrati dal rivelatore (*counter*), installato nella colonna BNCT, utilizzato per monitorare la potenza istantanea del reattore e permettere quindi una normalizzazione. Si è scelto di normalizzare i dati alla potenza del reattore corrispondente a 10000 cont/s, prassi utilizzata convenzionalmente dal centro di ricerca di Řež.

- Calibrazione con supporto SOTTILE:

Utilizzando i risultati ottenuti con i TLD-700 in questa configurazione, si sono eseguite due calibrazioni diverse dei TLD-700.

Una calibrazione è stata fatta utilizzando come parametro significativo il secondo picco della GC misurata, chiamato nel grafico *h2 Řež*, mentre nell'altra si è utilizzato come parametro significativo il secondo picco della curva relativa ai neutroni termici ottenuta in seguito alla separazione dei contributi, chiamato nel grafico *h2 neutroni*.

Il primo coefficiente di calibrazione è stato ottenuto facendo il rapporto tra l'altezza [u.a.] del secondo picco della GC misurata e il rateo di fluensa termica [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] il valore ottenuto è pari a 200 (u.a.).

Il secondo coefficiente di calibrazione è stato ottenuto facendo il rapporto tra l'altezza del secondo picco della curva relativa ai neutroni termici (ottenuta dopo la separazione) e il rateo di fluensa termica [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]. Il valore ottenuto è pari a 277 (u.a.).

Nella figura 34 sono riportati i risultati dei foglietti di attivazione sulla scala primaria [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] e i valori di *h2 Řež* sulla scala secondaria [u.a.].

Nella figura 35 sono riportati i risultati sulla scala primaria dei foglietti di attivazione [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ] e i valori di *h2 neutroni* sulla scala secondaria [u.a.].

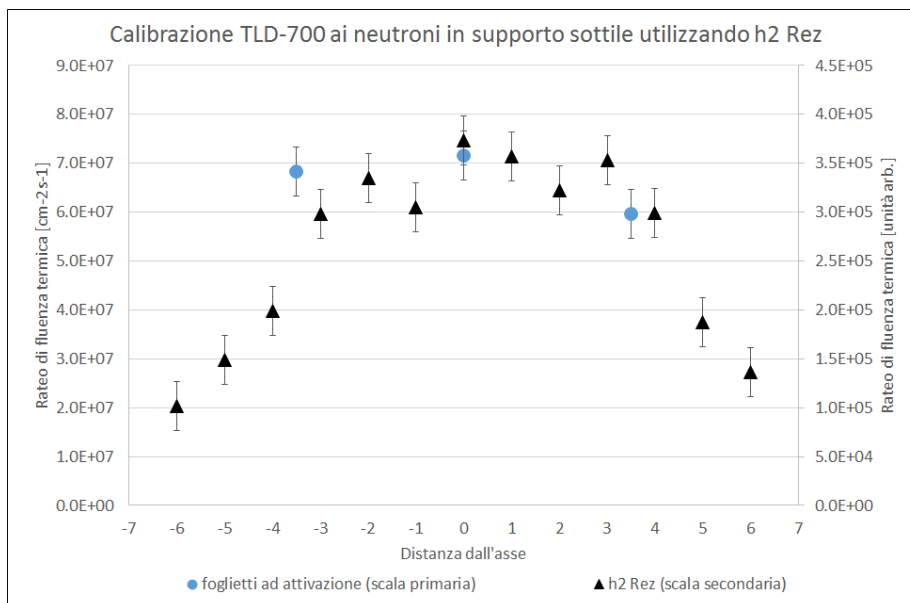


Figura 34: Calibrazione TLD-700 in supporto SOTTILE utilizzando come parametro h2 Řež

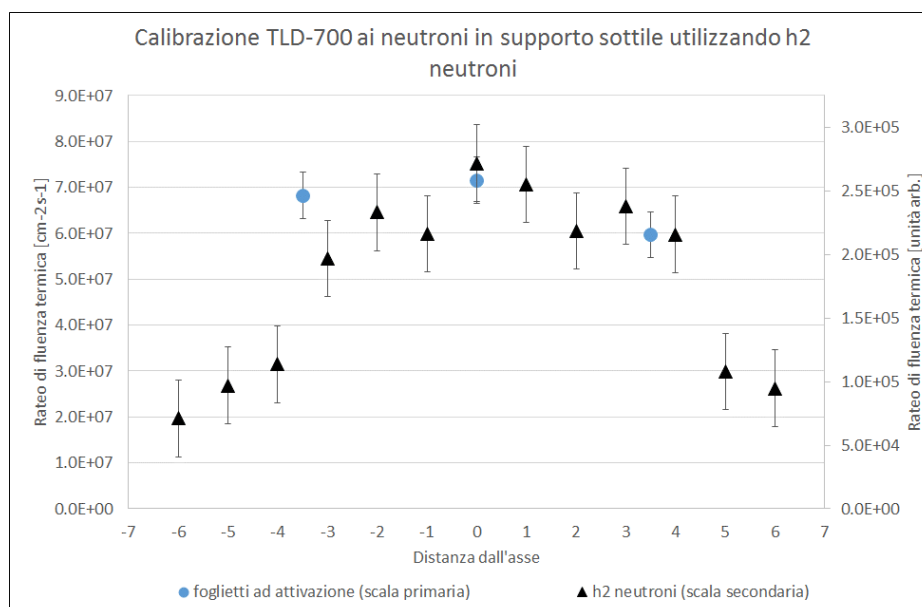


Figura 35: Calibrazione TLD-700 in supporto SOTTILE utilizzando come parametro h2 neutroni

### Calibrazione in FANTOCIO:

In questa configurazione abbiamo calibrato i TLD-700 utilizzando come parametro di riferimento solo il secondo picco della curva relativa ai neutroni termici, ottenuta dopo la separazione dei contributi. Questo parametro è chiamato nel grafico *h2 neutroni*.

Il coefficiente di calibrazione è il rapporto tra l'altezza [u.a.] del secondo picco della curva relativa ai neutroni termici e il rateo di fluensa termica neutronica [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] ottenendo un valore di 127.

Nella figura 36 sono riportati sulla scala primaria i risultati dei foglietti di attivazione [cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>] e sulla scala secondaria i valori di *h2 neutroni* [u.a.].

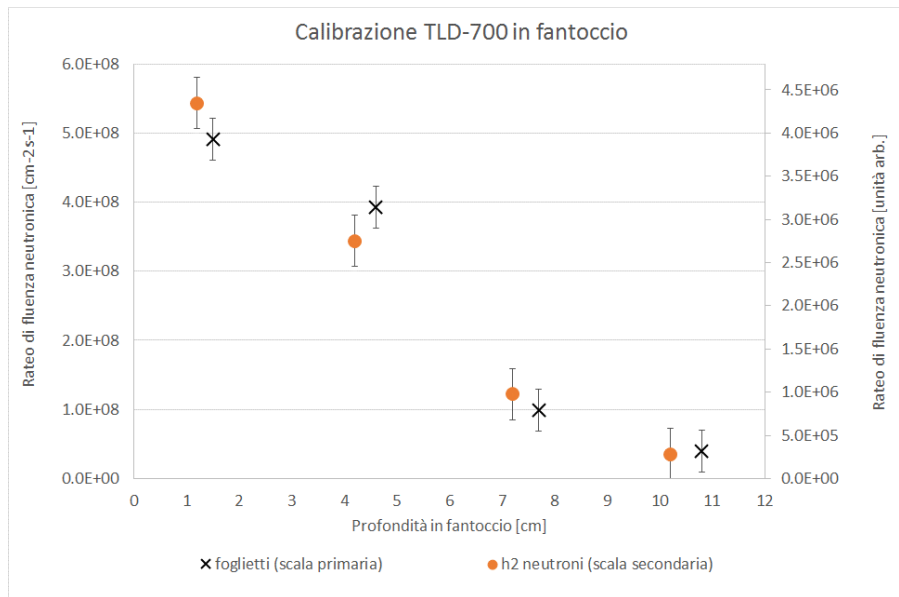


Figura 36: Calibrazione TLD-700 in FANTOCCIO utilizzando come parametro *h2 neutroni*

Facendo riferimento alle calibrazioni dei TLD-700 ottenute utilizzando il parametro *h2 neutroni* si può notare una grossa differenza fra i coefficienti di calibrazione ottenuti dai dati di irraggiamento in supporto SOTTILE e da quelli in fantoccio. Il risultato più affidabile risulta essere quello ottenuto dalle calibrazioni in supporto SOTTILE in quanto la configurazione utilizzata era esattamente la stessa di quella utilizzata per i foglietti di attivazione mentre per quanto riguarda la configurazioni in fantoccio non si ha la certezza, nonostante la massima attenzione prestata, di aver riempito la cavità del fantoccio esattamente con gli stessi materiali e di aver evitato la presenza di spazi vuoti che avrebbero perturbato il trasporto neutronico causando differenze nei risultati ottenuti.

## 5. DOSIMETRI A GEL DI FRICKE E TLD

Nella stessa campagna di misure sono state fatte misure con dosimetri a gel di Fricke. A causa delle incertezze intrinseche nei risultati della separazione dei contributi di dose ottenibili con tali dosimetri è opportuno effettuare alcune misure con dosimetri di altro tipo per validare i risultati ottenuti o eventualmente effettuare delle correzioni.

I risultati ottenuti dai TLD sono stati quindi confrontati con risultati ottenuti con dosimetri a gel di Fricke.

Per poter confrontare i risultati ottenuti dai due diversi tipi di dosimetri si sono studiate apposite configurazioni con cui irraggiare i dosimetri TLD di LiF. In una configurazione i dosimetri sono stati irraggiati in un piano longitudinale centrale del fantoccio di polietilene in modo da confrontare i risultati con quelli ottenuti nello stesso piano dai dosimetri a gel. Nell'altra configurazione i dosimetri TLD, sono stati immersi in un gel non dosimetrico in strutture che imitano dosimetri a gel. In questo modo la dose misurata dai TLD è la stessa che sarebbe misurata in quella posizione dal dosimetro a gel e quindi è possibile confrontare i due valori. Inoltre, confrontando i risultati con quelli ottenuti con i TLD irraggiati in supporto SOTTILE, è possibile valutare l'eventuale perturbazione al campo di radiazione provocato dai materiali costituenti il dosimetro a gel.

### 5.1. DOSIMETRI A GEL DI FRICKE

Misure dosimetriche utilizzando dosimetri a gel di Fricke hanno mostrato buone potenzialità per misure in fantoccio e in aria al fine di separare i contributi alla dose dovuti alla radiazione gamma ai neutroni veloci e ai neutroni termici (Bartese et al., 2009; Gambarini et al., 2010b). I dosimetri a gel di Fricke risultano essere tessuto equivalenti per quanto riguarda il trasporto neutronico e per la radiazione secondaria in quanto sono una soluzione acquosa diluita. La separazione dei contributi alla dose è ottenuta confrontando analiticamente la distribuzione di dose in coppie di dosimetri con differente composizione isotopica. Con una coppia di dosimetri composta da un dosimetro a gel di Fricke standard e un dosimetro a gel di Fricke borato (generalmente con 40 µg/g di  $^{10}\text{B}$ ), ovviamente irraggiati nelle medesime posizioni e configurazioni, si può separare la dose dovuta alle reazioni del  $^{10}\text{B}$  con i neutroni termici (da cui è immediato ricavare la fluenza termica utilizzando il fattore di KERMA) e una dose dovuta alla radiazione gamma e ai neutroni veloci che però sono sentiti dal dosimetro con una sensibilità più bassa. Nel caso di fasci termici in genere il contributo della

componente veloce è trascurabile e quindi la dose misurata è la dose gamma. Nel caso di fasci epitermici, che hanno sempre una coda veloce, in genere la dose dovuta ai neutroni veloci non è trascurabile e quindi va separata. A tale fine si utilizzano due dosimetri a gel di Fricke standard, uno fatto utilizzando acqua l'altro utilizzando acqua pesante. La differenza di dose misurata è dovuta alla diversa energia rilasciata dai protoni di rinculo nel caso del dosimetro prodotto con acqua leggera e dai deutoni di rinculo nel caso del dosimetro prodotto con acqua pesante (Gambarini et al., 2010b).

La preparazione dei dosimetri a gel ha seguito il metodo studiato e protocollato presso il laboratorio (Gambarini et al., 2004b) e la composizione standard di tali dosimetri è la seguente:

- Solfato di ferro [1mM  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ].
- Acido solforica [25 mM  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ].
- Xylenol Orange [0.165mM  $\text{C}_{31}\text{H}_{27}\text{N}_2\text{Na}_5\text{O}_{13}\text{S}$ ].
- Porcine skin [3% del peso finale].

I dosimetri a gel di Fricke sono radiocromici e la dose assorbita è proporzionale (fino a saturazione) all'assorbanza della luce con lunghezza d'onda nell'intorno di 585 nm dovuta al complesso formato dallo Xylenol Orange con gli ioni ferrici prodotti in seguito all'irraggiamento. I dosimetri a gel di Fricke messi a punto nel laboratorio sono in forma di strati. Prima della gelificazione, la soluzione è inserita in appositi telai di forma svariata di 3 mm di spessore chiusi tra due strati trasparenti di polistirene di 1 mm di spessore. Vengono acquisite immagini di trasmittanza prima e dopo l'irraggiamento e si valuta la differenza di densità ottica che è correlata alla dose assorbita. La sensibilità di questi dosimetri dipende dal LET della radiazione. Quindi negli irraggiamenti nel campo misto n- $\gamma$  di una colonna epitermica di un reattore nucleare la radiazione gamma le particelle cariche dovute alle reazioni con i neutroni termici e i protoni di rinculo dovuti alla coda veloce del fascio sono sentiti in modo diverso. I risultati delle separazioni dei contributi di dose effettuate irraggiando coppie di dosimetri con diversa composizione isotopica risultano affette da un errore che è determinato da molteplici cause. Un errore può essere dovuto all'imprecisione delle pesate dei composti chimici utilizzati che sono introdotti in quantità molto piccole. Inoltre la risposta dipende da alcuni parametri quale il rateo di raffreddamento alla fine della preparazione e il tempo intercorso tra la calibrazione e l'utilizzo per le misure di interesse. Queste incertezze possono essere ridotte con opportuni protocolli effettuati in fase di calibrazione. Invece se questi dosimetri sono utilizzati per valutare fluenze termiche i motivi di incertezza sono più grandi e al fatto che non è ancora noto il coefficiente di sensibilità dei dosimetri a gel alle particelle cariche generate dalle

reazioni dei neutroni termici con il  $^{10}\text{B}$ . Una delle finalità di questa campagna di misure è stata di migliorare la conoscenza di questo coefficiente di sensibilità che è stato ricavato utilizzando i risultati di fluensa termica ottenuti dalle misure di attivazione. Come si vedrà dai risultati riportati sotto la sensibilità dei dosimetri a gel al LET di queste particelle non è stata determinata con precisione nemmeno in questo esperimento. Con i dosimetri a gel si ottengono andamenti di distribuzione spaziale ma i valori assoluti di fluensa termica non sono ancora ben determinabili. Questo dimostra che è importante effettuare misure di fluensa termica con altri metodi, ovviamente si potrebbe a questo scopo, per ogni configurazione, effettuare misure di attivazione ma tali misure non risultano agevoli mentre sono più adatte misure di fluensa termica con TLD che non perturbano il campo di radiazione.

I dosimetri a gel di Fricke irraggiati in questa campagna di misure sono dischi di 12 cm di diametro e 0.5 cm di spessore (0.3 cm di gel dosimetrico più 0.2 cm dei dischi di polistirene) per le misure in aria, mentre per le misure in fantoccio sono stati utilizzati dosimetri rettangolari di 12 cm di lunghezza, 6 cm di larghezza e 0.5 cm (0.3 cm di gel dosimetrico più 0.2 cm dei dischi di polistirene) di spessore, coppie di dosimetri con e senza  $^{10}\text{B}$  sono stati inseriti contro un piano longitudinale centrale del fantoccio.

Le misure sono state condotte utilizzando la colonna BNCT.

## **5.2 CONFIGURAZIONI DEGLI IRRAGGIAMENTI IN ARIA**

Sono state fatte con i TLD misure in aria e in fantoccio.

Per quanto riguarda gli irraggiamenti in fantoccio la descrizione della configurazione è già stata fatta nel capitolo 4. Di seguito è descritta la configurazione appositamente studiata per gli irraggiamenti in aria.

Si è preparato un "finto" dosimetro a gel, nel modo seguente. Si è riempito un becher con acqua e gelificante Porcine Skin (6 g di Porcine Skin ogni 100 ml d'acqua) e lo si è lasciato per 15 minuti a temperatura ambiente per far sì che il Porcine Skin si diluisse nella soluzione; in seguito il becher è stato riscaldato a bagnomaria ad una temperatura di circa 45°C, su un fornello dotato di agitatore magnetico. La rotazione dell'ancoretta magnetica è stata mantenuta lenta per evitare la produzione di vortici. La temperatura è stata controllata grazie ad un apposito termometro e mantenuta costante. Passati 20 minuti, il becher è stato tolto dal fornello ed è stato lasciato raffreddare fino alla temperatura di 35°C. Infine la soluzione così ottenuta è stata inserita in una struttura costituita da un telaio anulare di polistirene avente diametro esterno di 12 cm diametro interno di 11 cm e

spessore di 3 mm racchiuso tra due dischi di polistirene di 12 cm di diametro e 1 mm di spessore. Questa struttura corrisponde esattamente a quella dei dosimetri a gel utilizzati per le misure in aria. Questo campione è stato posto in frigorifero. Il giorno seguente è stato staccato uno dei due strati di polistirene e nel gel che si era nel frattempo formato sono stati inseriti i TLD che erano stati preventivamente coperti con Teflon sottile per evitarne il contatto con il gel. I TLD sono stati posizionati nella regione centrale del disco come si può vedere nella figura 37. Con questa configurazione, mantenendo la stessa geometria di irraggiamento dei dosimetri Fricke-gel, si è voluto verificare, come detto in precedenza, se i dosimetri a gel utilizzati modificano le caratteristiche del campo di radiazione che si vuole misurare.



*Figura 37: TLD-700 inseriti in gel non dosimetrico*

I TLD-700 in questa configurazione sono stati irraggiati per 16.73 minuti nella colonna BNCT.

## **5.3 RISULTATI**

### **5.3.1 RISULTATI IN ARIA**

I risultati dei profili in aria ottenuti con i dosimetri TLD-700 immersi in gel sono riportati qui di seguito insieme ai risultati ottenuti dai dosimetri a gel di Fricke.

Come si può notare dalla figura 38 i risultati relativi al rateo di dose gamma sono concordanti in quanto i due diversi tipi di dosimetri in seguito alle rispettive tarature gamma portano a risultati che coincidono entro l'errore di misura.



In figura 39 sono riportati i valori di parametro che è proporzionale alla fluenza termica e su scala secondaria la dose che è dovuta alle particelle prodotte dalle reazioni dei neutroni termici con il  $^{10}\text{B}$  misurata con una coppia di dosimetri a gel standard e borato. Come parametro in questo caso si è scelta l'altezza del primo picco ( $h1$  neutroni) della curva ottenuta dalle GC dei TLD-700 dopo aver sottratto, pixel a pixel, il contributo dovuto alla radiazione gamma per ogni dosimetro. Se la dose gamma è stata valutata correttamente questo parametro è proporzionale alla fluenza termica. Come si può notare dalla figura 39 gli andamenti spaziali dei profili ottenuti con i gel e con i TLD sono consistenti.

La dose da Boro misurata con i dosimetri a gel riportata nella figura è stata ottenuta utilizzando lo stesso coefficiente di sensibilità utilizzato negli esperimenti precedenti con questi dosimetri. Non è stato possibile utilizzare i dati riportati in figura 39 per migliorare la conoscenza di tale sensibilità in quanto non è stato possibile ricavare un coefficiente di calibrazione dei TLD-700 ai neutroni termici. I risultati mostrati nelle figure 38 e 39 infatti sono relative a una campagna di misure effettuata nel 2013. Le misure che hanno permesso di ottenere la calibrazione dei dosimetri a TL sono state eseguite in una campagna effettuata nel 2014 e non è stato possibile utilizzarle per calibrazioni relative alle misure del 2013 come avevamo inizialmente sperato. Infatti per qualche problema a noi sconosciuto relativo al reattore LVR-15 nell'anno 2013 i parametri specifici del fascio erano diversi: la dose gamma era più elevata e la fluenza termica era diversa ma in modo sconosciuto, solo gli andamenti delle distribuzioni spaziali sono rimaste le stesse. Dalla figura 39 si può dedurre che se fossero stati disponibili dati di calibrazione del parametro utilizzato per i TLD-700 sarebbero stati ottenuti i valori di fluenza che sarebbero stati utili per l'indagine sulla sensibilità dei dosimetri a gel di Fricke.

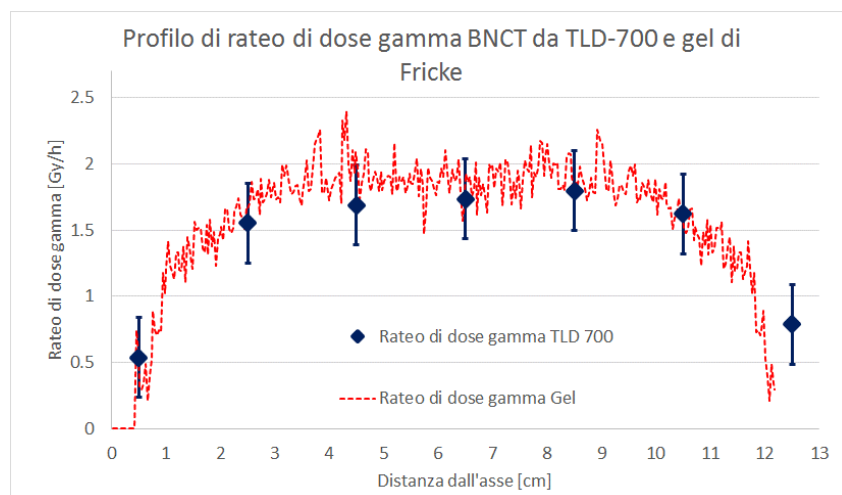


Figura 38: Profili di rateo di dose gamma in colonna BNCT ottenuti con TLD-700 e gel di Fricke

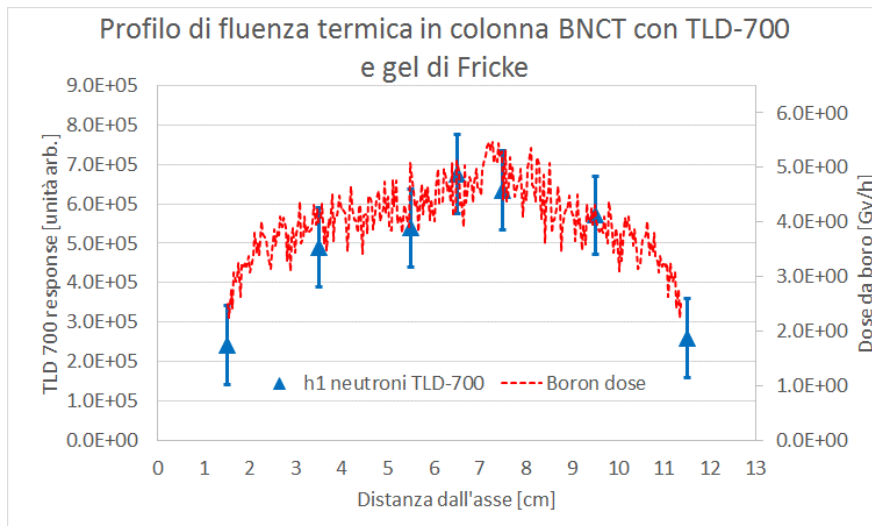


Figura 39: Profilo di fluensa termica in colonna BNCT valutata con TLD-700 e gel di Fricke

Per quanto riguarda l'indagine sull'eventuale perturbazione al campo di radiazione dei materiali costituenti i dosimetri a gel è stato fatto un confronto tra i risultati ottenuti dai TLD inseriti nella struttura che simula il dosimetro a gel e quelli inseriti in supporto SOTTILE. In figura 40 sono riportati i valori di rateo di dose gamma misurati nelle due configurazioni in funzione della distanza dall'asse del fascio. Entro l'errore sperimentale non appare che vi siano differenze tra le dosi misurate nei due casi.

Per quanto riguarda la fluensa termica è stato utilizzato il parametro *h1 neutroni* descritto sopra ricavato dalle GC dei TLD-700 irraggiati in supporto SOTTILE e in supporto tipo dosimetro a gel. I risultati sono riportati in figura 41. E' evidente dai dati della figura che i materiali con cui sono fatti i dosimetri a gel provoca una variazione alla fluensa termica fuori all'errore di misura. Si dovrà sempre tener conto di questo se si vorranno valutare le fluense termiche per mezzo dei dosimetri a gel di Fricke.

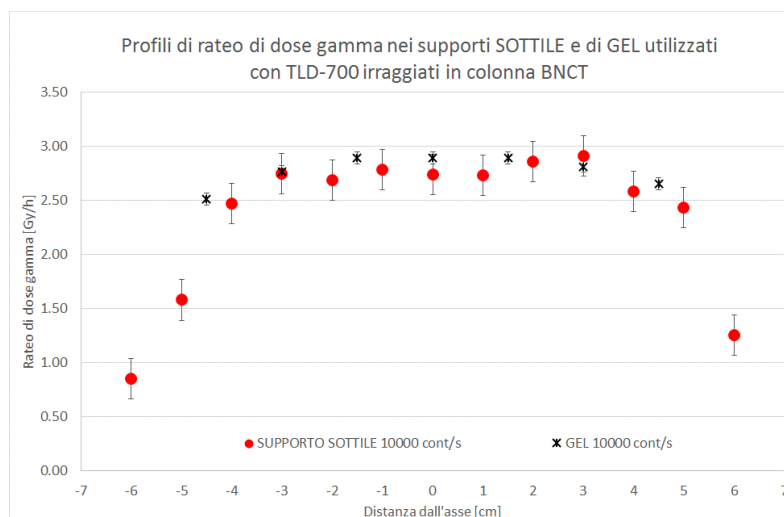


Figura 40: Rateo di dose gamma misurato con TLD-700 in supporto SOTTILE e finto gel, in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT

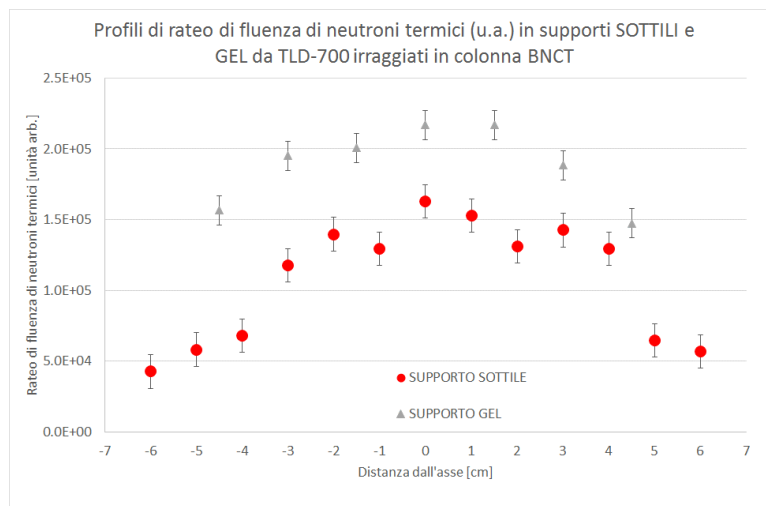


Figura 41: Fluenza termica (u.a.) misurato con TLD-700 in supporto SOTTILE e finto gel, in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT

### 5.3.2 RISULTATI DELLE MISURE IN FANTOCIO

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti in fantoccio con i dosimetri TLD-700, insieme ai risultati ottenuti dai dosimetri a gel di Fricke. Tali dosimetri sono stati disposti in fantoccio come descritto nel capitolo 4.

In figura 42 sono riportati i risultati di rateo di dose gamma ottenuti con i TLD-700 applicando la relazione (3) nella stessa figura sono riportati dei profili di dose ottenuti con dosimetro a gel di Fricke. L'andamento tratteggiato è il profilo di dose totale *gamma-equivalente* che comprende anche la dose da neutroni veloci che non è stata misurata data la complessità di fare dosimetri con acqua pesante. Per ricavare la dose gamma è stato supposto che fosse possibile utilizzare un profilo di dose veloce in fantoccio d'acqua ottenuto in campagne precedenti. Il risultato ottenuto sottraendo questa dose riportato nella figura 42 si è sovrapposto ai risultati ottenuti con i TLD che in questo caso sono serviti a validare le operazioni effettuate sui dosimetri a gel.

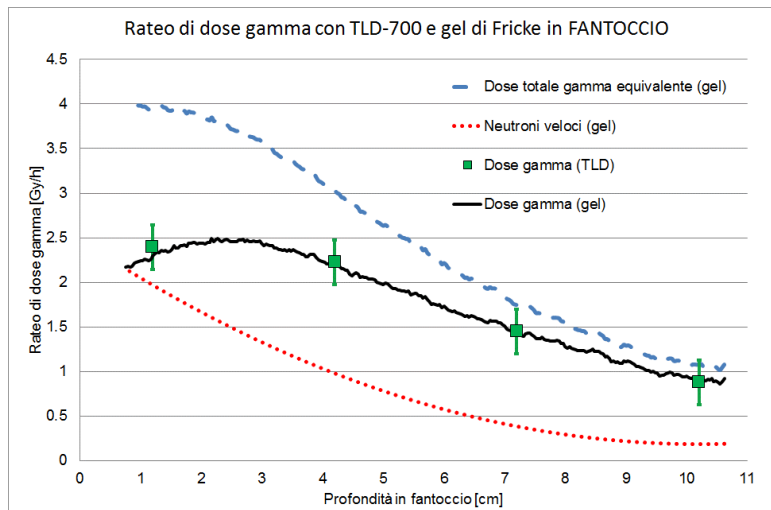


Figura 42: Andamento del rateo di dose gamma in funzione della profondità in fantoccio misurata con TLD-700 e gel di Fricke

Per quanto riguarda l'informazione sulla sensibilità del dosimetro a gel di Fricke al LET delle particelle cariche dovute alle interazioni dei neutroni termici con il  $^{10}\text{B}$  non è stato possibile arrivare a risultati significativi per lo stesso tipo di problema che aveva portato una discrepanza relativamente ai coefficienti di calibrazione discussa nel capitolo 4.6.

Nella figura 43 sono riportati i valori di rateo di fluensa termica, a diverse profondità in fantoccio, con i foglietti di attivazione nel fantoccio e quelli ottenuti con i TLD-700, irraggiati in fantoccio, utilizzando la calibrazione ottenuta nella configurazione di supporto SOTTILE. Nella figura 43 è anche riportato il profilo di della dose da boro misurata con un dosimetro a gel moltiplicato per due diversi coefficienti tali da riportarlo sopra i valori di fluensa misurati. E' evidente quindi che il coefficiente di sensibilità del dosimetro di Fricke che si voleva indagare risulta notevolmente diverso a seconda che come fluensa termica si prenda l'una o l'altra delle due categorie di risultati. E' evidente che questo tipo di indagine dovrà essere riprogrammata in futuri esperimenti.

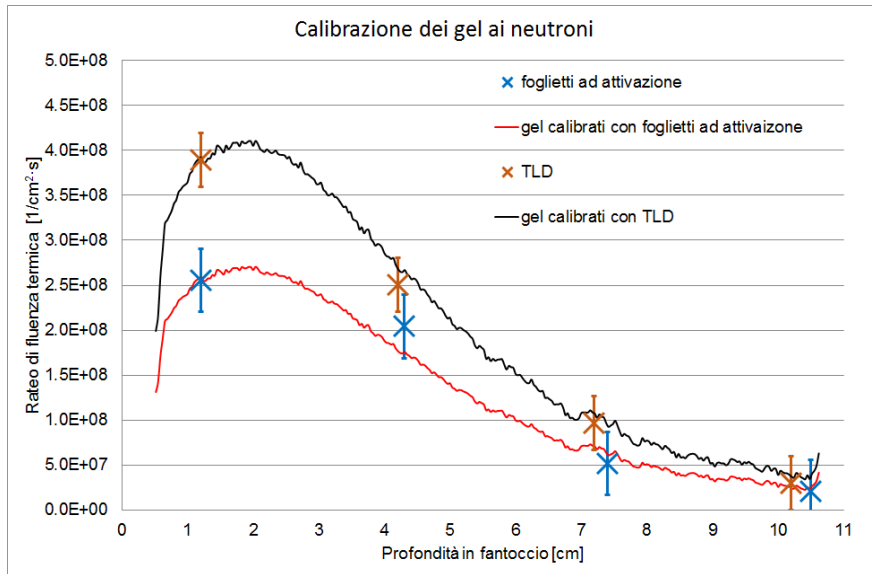


Figura 43: Calibrazione ai neutroni dei dosimetri a gel di Fricke utilizzando TLD-700 e foglietti di attivazione

## 6. DOSIMETRI DI ALANINA E TLD

Si sono effettuate misure anche con TLD e dosimetri di alanina irraggiati con le stesse configurazioni. L'opportunità di questo accoppiamento è legato all'interesse di valutare la dose dovuta a neutroni epitermici e veloci nel caso di fasci epitermici.

La dose dovuta ai neutroni veloci e/o epitermici dovuta a reazioni di scattering elastico che generano nuclei di rinculo non è trascurabile in materiali con un contenuto significativo di Idrogeno. La misura di tale dose è di difficile valutazione senza dosimetri che contengano una sufficiente quantità di Idrogeno in quanto l'energia rilasciata dai nuclei di rinculo più pesanti non è apprezzabile. Di conseguenza i dosimetri di alanina risultano promettenti in quanto la loro composizione chimica  $[\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}]$  è molto simile a quella del tessuto biologico relativamente al contenuto di Idrogeno. Il contributo nella risposta dovuto ai neutroni epitermici e/o veloci è però sommato nella risposta dei dosimetri al contributo dovuto alla radiazione gamma e può quindi essere valutato solo sottraendo la dose gamma misurata attraverso un altro tipo di dosimetro.

Associando misure con dosimetri di alanina a misure con dosimetri che invece sono insensibili ai neutroni veloci e/o epitermici sarebbe quindi possibile separare il contributo di dose dovuto ai neutroni veloci e/o epitermici da quello della radiazione gamma, previa opportuna calibrazione dei dosimetri.

I TLD non contenendo Idrogeno sono praticamente insensibili ai neutroni epitermici e veloci e quindi risultano particolarmente promettenti a tale finalità.

L'alanina contiene Azoto che reagisce con neutroni termici producendo protoni di 630 KeV che rilasciano la loro energia in pochi mm di percorso ovvero entro il dosimetro stesso. La risposta dell'alanina in seguito a irraggiamento in fantoccio con neutroni epitermici contiene quindi contributi dovuti alla radiazione gamma, ai neutroni termici e neutroni epitermici/veloci. Risulta quindi necessario sottrarre i contributi dovuti alla radiazione gamma e ai neutroni termici. Per quanto riguarda quest'ultimo contributo un metodo proposto è quello di fare misure comparative con alanina senza Boro e alanina con Boro (Baccaro et al., 2004; Cecilia et al., 2004). Per quanto riguarda il contributo dovuto alla radiazione gamma, la nostra proposta è quella di utilizzare il valore di dose gamma ricavato da dosimetri TLD-700 come descritto sopra.

Per poter effettuare tali operazioni sono state fatte misure con alanina borata e non borata, TLD-700 e TLD-100 irraggiati nelle stesse configurazioni in modo tale che il campo di radiazione fosse pressoché identico per i vari dosimetri da confrontare.

Sono state effettuate valutazioni di dose gamma con i TLD-700 e valutazioni di fluenza termica con TLD-700 e TLD-100 al fine di fare un confronto con i dati di fluenza ottenuti mediante i dosimetri di alanina.

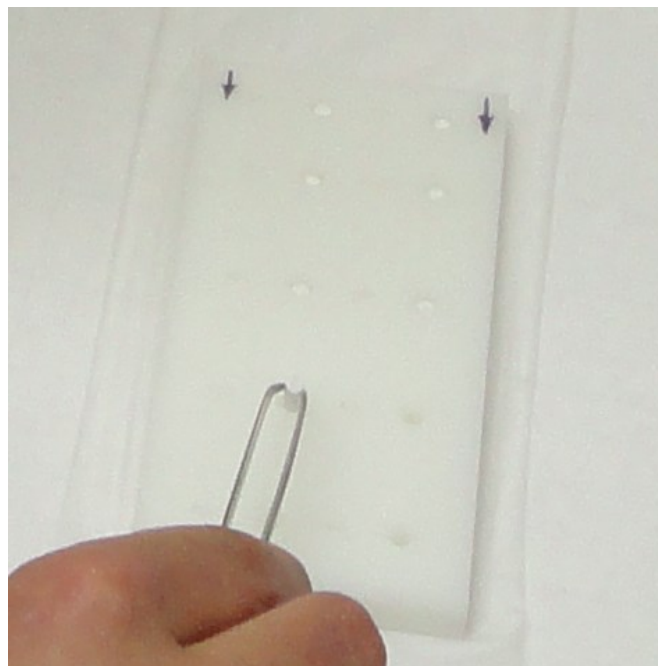
## 6.1 Configurazioni

I dosimetri di alanina, con e senza Boro, sono dei cilindri di diametro 0.4 cm e altezza 0.9 cm. Tali dosimetri sono stati irraggiati in tre diverse configurazioni:

### 6.1.1 MISURE IN FANTOCIO:

Il fantoccio di polietilene in cui sono stati inseriti i dosimetri è il solito descritto precedentemente mentre il supporto utilizzato per posizionare a coordinate note i dosimetri di alanina è una barretta di materiale plastico di 13.5 cm di lunghezza, 6.5 cm di larghezza e 1 cm di spessore in cui è presente una matrice di cinque righe e due colonne di fori. Le righe si trovano rispettivamente alla profondità di 1 cm, 3 cm, 6 cm, 9 cm e 12 cm mentre le colonne sono distanti 2.5 cm. Ogni irraggiamento prevedeva quindi l'utilizzo di 10 dosimetri di alanina.

I dosimetri sono stati fissati al supporto con l'aiuto di Parafilm<sup>®</sup>M. In figura 44 sono mostrate le operazioni di inserimento dei dosimetri nel supporto.



*Figura 44: Inserimento alanina in supporto*

Tale supporto è stato quindi inserito nel fantoccio in modo che l'asse del fascio passasse nella mezzzeria delle 2 colonne di fori al cui interno erano presenti i dosimetri.

I dosimetri di alanina borata sono stati irraggiati per circa 14 ore durante la notte, mentre i dosimetri di alanina non borata sono stati irraggiati per circa 12 ore sempre durante la notte.

Nello stesso fantoccio sono state fatte misure con TLD descritte nel capitolo 4.

### 6.1.2 MISURE IN ARIA:

Supporto ALANINA:

Tale supporto preparato da un gruppo Palermo/Pavia è un barretta di polistirene a sezione rettangolare di dimensioni 14 cm x 1 cm x 0.6cm, con 11 coppie di fori cilindrici di raggio 0.2cm ed altezza 1cm in cui sono stati inseriti i dosimetri. La scelta di questa geometria è stata fatta per assicurare l'equilibrio delle particelle cariche.

Per ogni coppia di fori sono stati inseriti un dosimetro di alanina con Boro e un dosimetro di alanina senza Boro. In questo modo si potevano considerare uguali, per i due dosimetri di ogni coppia, le dosi gamma assorbite e le fluenze di neutroni di qualunque energia che attraversano il dosimetro.

I dosimetri di alanina sono stati fissati al supporto con l'aiuto di Parafilm®M.

Sono stati fatti due irraggiamenti per ogni colonna nelle ore notturne, per circa 12 ore.

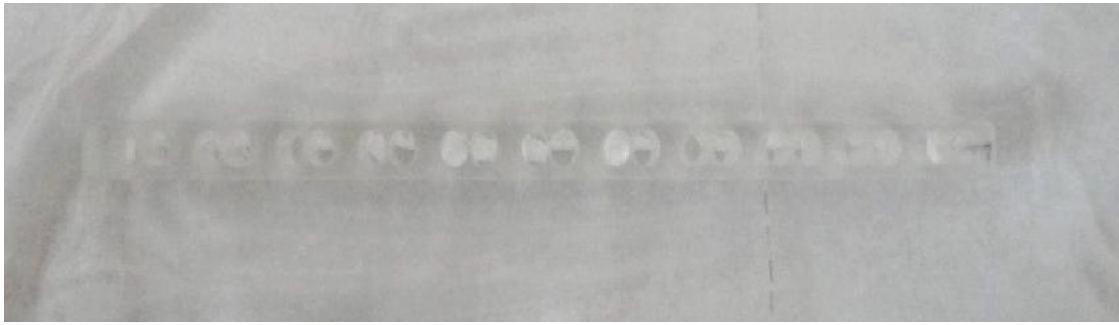
In questo stesso supporto sono stati fatti anche irraggiamenti con TLD-700 e TLD-100 i quali, dopo essere stati avvolti in teflon, sono stati introdotti nei fori ove è stato inserito poi del Parafilm®M per ridurre la presenza di spazi vuoti.

Nella figura 45 è visibile il supporto ALANINA visto lateralmente. Si possono notare le 11 coppie di fori. Nella figura 46 è visibile il supporto ALANINA pronto per l'irraggiamento con all'interno inseriti i dosimetri di alanina.



*Figura 45: Supporto ALANINA visto lateralmente*





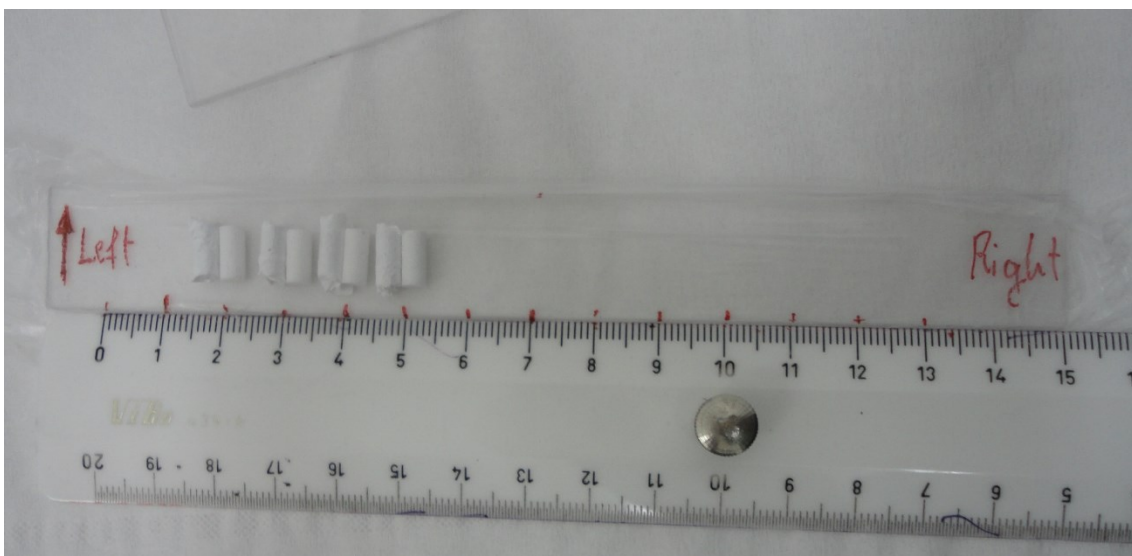
*Figura 46: TLD inseriti in supporto ALANINA pronto per l'irraggiamento*

I TLD-700 in questa configurazione sono stati irraggiati per 16.72 minuti nella colonna BNCT e per circa 30 minuti nella colonna HK1, mentre i TLD-100 sono stati irraggiati per 1.95 minuti nella colonna BNCT e per circa 4 minuti nella HK1.

#### Supporto SOTTILE:

Per valutare l'eventuale entità della perturbazione al campo di radiazione dovuta alla quantità non piccola di materiale che costituisce il supporto ALANINA è stato fatto un irraggiamento di confronto in un supporto costituito dalle stesse stecche sottili di polistirene utilizzate per i TLD.

Sono state utilizzate a tale scopo 10 coppie di dosimetri. Ogni coppia prevedeva un dosimetro di alanina non borata e un dosimetro di alanina borata avvolti in teflon; le coppie sono state messe a una distanza di 1 cm come si può vedere in figura 47 e sono state fissate alle stecche di polistirene con Parafilm®M.



*Figura 47: Preparazione supporto SOTTILE con alanina*

I dosimetri in questa configurazione sono stati irraggiati per circa 12 ore nelle ore notturne.

In questa configurazione sono stati fatti anche irraggiamenti con TLD-700 e TLD-100 descritti nel capitolo 4.

## 6.2 RISULTATI

I risultati ottenuti con i TLD in aria in supporto SOTTILE e in fantoccio stati mostrati nel capitolo 4.

I risultati ottenuti nel supporto ALANINA sono riportati qui sotto:

### 6.2.1 TLD-700:

- *DOSE GAMMA:*

Di seguito sono riportati i ratei di dose gamma ottenuti con TLD-700 in supporto ALANINA. Nelle tabelle 17 e 18 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente nella colonna BNCT e nella HK1.

TLD-700 SUPPORTO ALANINA COLONNA BNCT		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma per 10000 cont/s [Gyh-1]
D2	-6.25	1.51
	-5.00	
D3	-3.75	2.58
D4	-2.50	2.52
D5	-1.25	2.52
D6	0.00	2.52
D8	1.25	2.53
D9	2.50	2.50
	0.00	
E1	5.00	2.33
	6.25	

*Tabella 17: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA*

TLD-700 SUPPORTO ALANINA COLONNA HK1		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma [Gyh-1]
E2	-6.25	0.10
	0.00	
E3	-3.75	0.31
	0.00	
E4	-1.25	0.40
E5	0.00	0.37
E6	1.25	0.38
E7	2.50	0.37
	0.00	
E8	5.00	0.35
	6.25	

Tabella 18: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA

Nelle figure 48 e 49 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per la colonna BNCT e per la colonna HK1. Nelle figure sono stati riportati anche i risultati ottenuti precedentemente in supporto SOTTILE per evidenziarne le eventuali differenze al fine di indagare l'effetto sulle dosi misurate dovuto alle geometrie e ai materiali dei supporti.

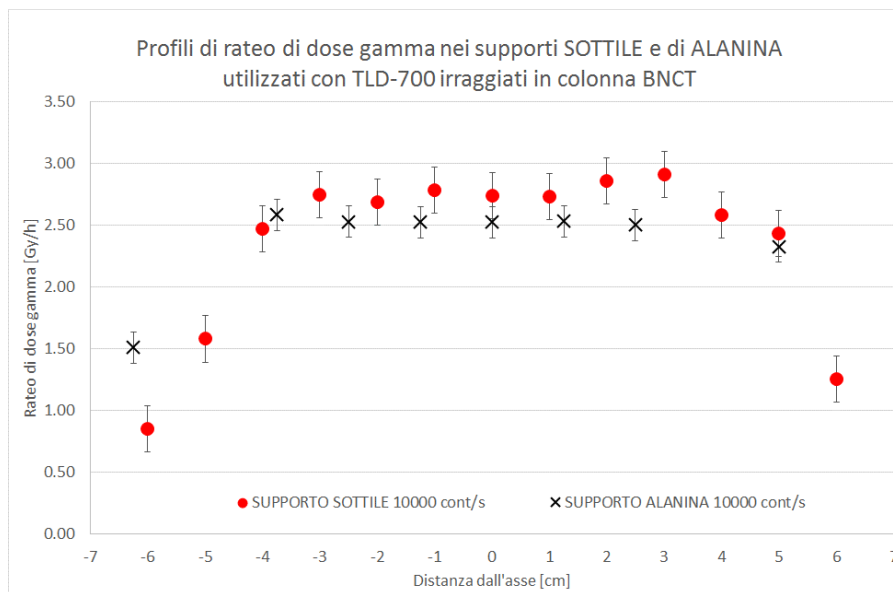


Figura 48: Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE

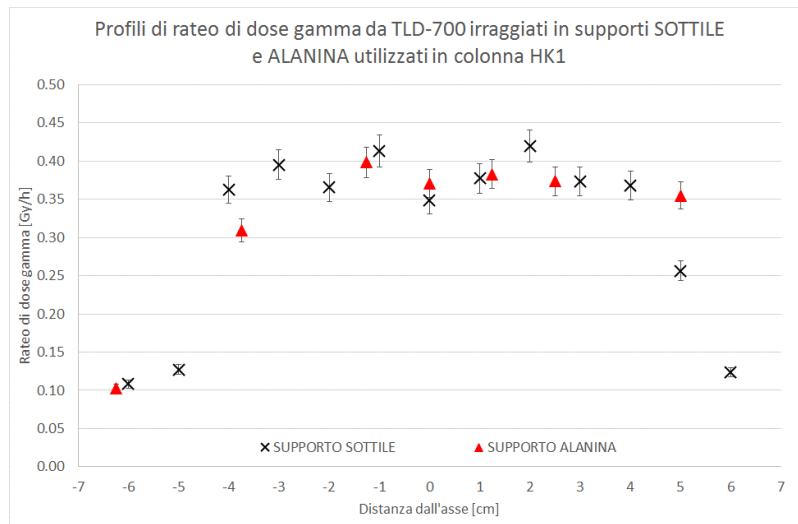


Figura 49: Profilo di rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE

Si nota una differenza tra i risultati ottenuti fuori dall'errore sperimentale col fascio moderato della colonna BNCT. Ulteriori considerazioni di questo risultato saranno discusse qui sotto insieme ai risultati ottenuti per la fluenza termica.

- FLUENZA DI NEUTRONI TERMICI:

Di seguito sono riportate le fluenze termiche in unità arbitrarie ottenute con TLD-700 in supporto ALANINA. Nelle tabelle 19 e 20 sono riportati i risultati ottenuti per il parametro  $h_2$  neutroni scelto per la determinazione della fluenza termica, rispettivamente nella colonna BNCT e nella HK1.

TLD-700 SUPPORTO ALANINA COLONNA BNCT		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	$h_2$ neutroni
D2	-6.25	6.17E+04
	-5.00	
D3	-3.75	9.97E+04
D4	-2.50	1.08E+05
D5	-1.25	1.13E+05
D6	0.00	1.19E+05
D8	1.25	1.17E+05
D9	2.50	1.20E+05
	0.00	
E1	5.00	6.13E+04
	6.25	

Tabella 19: Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA

TLD-700 SUPPORTO ALANINA COLONNA HK1		
TLD	Distanza dall'asse [cm]	h2 neutroni
E2	-6.25	3.23E+03
	0.00	
E3	-3.75	3.68E+05
	0.00	
E4	-1.25	4.89E+05
E5	0.00	4.75E+05
E6	1.25	5.10E+05
E7	2.50	5.31E+05
	0.00	
E8	5.00	4.54E+05
	6.25	

Tabella 20: Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA

Nelle figure 50 e 51 sono raffigurati i profili trasversali della fluenza termica utilizzando i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per la colonna BNCT e per la HK1. Nelle figure sono stati riportati anche i risultati ottenuti precedentemente in supporto SOTTILE per evidenziarne le eventuali differenze.

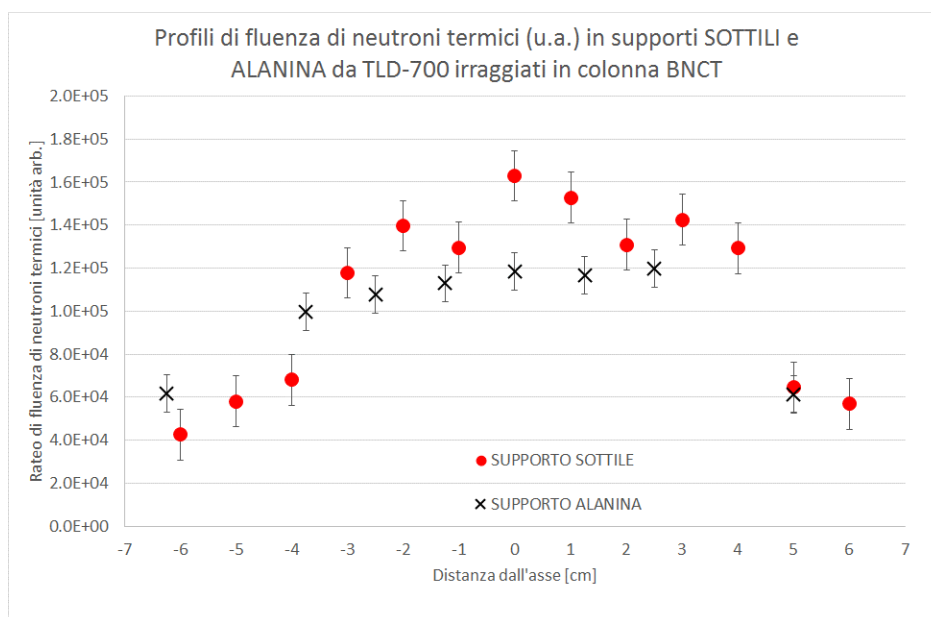


Figura 50: Profilo di fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE

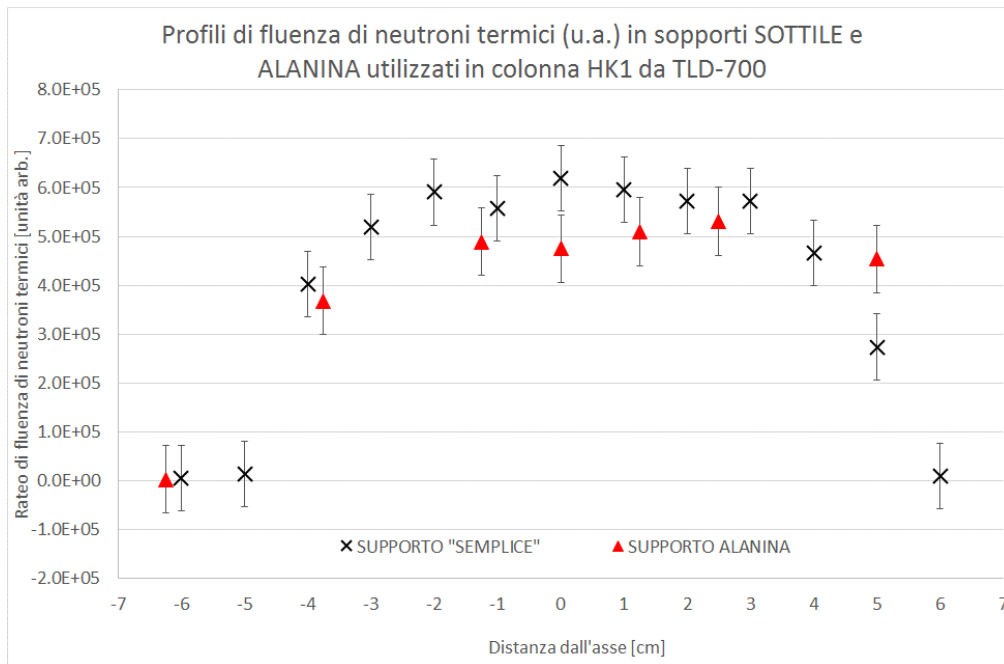


Figura 51: Profilo di fluena di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-700 nel supporto ALANINA e SOTTILE

Si può verificare, in entrambi i risultati, che la fluena termica nel supporto ALANINA risulta più bassa rispetto a quella misurata nel supporto SOTTILE, al di sopra dell'errore sperimentale.

Una interpretazione di questi risultati e di quelli ottenuti relativamente alla dose gamma non è semplice a causa della molteplicità dei meccanismi coinvolti. E' opportuno ricordare che i fasci di neutroni che incidono sui campioni nelle due colonne hanno uno spettro energetico diverso. Infatti la colonna HK1 è una colonna termica mentre il fascio della colonna BNCT è un fascio epitermico moderato da uno strato di 2 cm di polietilene. Questa differenza di spettro provoca ovviamente differenze nella distribuzione spaziale dei neutroni termici all'interno dei campioni irraggiati.

Nei materiali irraggiati col fascio termico della colonna HK1 si ha prevalentemente uno smorzamento del flusso termico approssimativamente esponenziale in funzione della profondità. E' quindi ovvio che si sia misurato uno smorzamento maggiore nel supporto ALANINA rispetto al supporto SOTTILE. Relativamente alla dose gamma è ragionevole che non si notino differenze misurabili in quanto questa dose è dovuta fondamentalmente al fondo (ovvero reattore e materiali che costituiscono la colonna) dato che i gamma (da 2.2 Mev) prodotti dai neutroni termici nelle reazioni con l'Idrogeno entro i supporti di polistirene non possono dare una differenza misurabile della dose assorbita dal dosimetro.

Nei materiali irraggiati col fascio epitermico moderato della colonna BNCT, l'andamento del flusso termico non è facilmente ipotizzabile, perché dipende da più parametri, in particolare dalla forma dello spettro energetico, dallo spessore del materiale su cui incide il fascio e dalla sua estensione

rispetto alla bocca del collimatore. I risultati hanno mostrato che nel supporto ALANINA sia la dose gamma sia il flusso termico sono più bassi, fuori dall'errore sperimentale, rispetto a quelli nel supporto SOTTILE. L'interpretazione esauriente di questo fenomeno richiederebbe studi dedicati sia sperimentali sia con simulazioni Monte Carlo. Comunque i risultati ottenuti sono importanti non solo per l'elaborazione dei risultati di questo esperimento TLD-alanina, ma anche per una corretta progettazione di configurazioni di irraggiamento in futuri esperimenti.

### 6.2.2 TLD-100

Anche nel supporto ALANINA, come discusso nel capitolo 4, ci si aspetta che i TLD-100 risultino inaffidabili per stimare la dose gamma, mentre potrebbero essere utilizzati, previa una adeguata calibrazione ai neutroni termici, per stimare la fluenza termica.

- *DOSE GAMMA:*

Di seguito sono riportati i ratei di dose gamma ottenuti con TLD-100 in supporto ALANINA. Nelle tabelle 21 e 22 sono riportati i risultati ottenuti rispettivamente nella colonna BNCT e nella colonna HK1.

TLD-100 SUPPORTO ALANINA COLONNA BNCT		
TLD	distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma normalizzato a 10000 cont./s[Gyh-1]
g4	-6.25	7.72
g5	-5.00	6.84
g6	-3.75	5.09
g7	-2.50	12.94
g8	-1.25	8.38
g9	0.00	8.70
d1	1.25	4.86
d2	2.50	11.34
d3	3.75	8.56
d4	5.00	7.90
d5	6.25	6.55

Tabella 21: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA

TLD-100 SUPPORTO ALANINA COLONNA HK1		
TLD	distanza dall'asse [cm]	Rateo di dose gamma [Gyh-1]
d6	-6.25	0.37
d7	-5.00	2.19
d8	-3.75	-5.30
d9	-2.50	-10.73
e1	-1.25	-11.41
e2	0.00	-6.95
e3	1.25	1.04
e4	2.50	-25.00
e5	3.75	-1.85
e6	5.00	-5.71
	6.25	

Tabella 22: Rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA

Come già spiegato nel capitolo 4, i TLD-100 offrono risultati inaffidabili in quanto, in entrambe le colonne, la dose gamma ricevuta da questi dosimetri risulta essere una piccolissima percentuale della *dose totale gamma-equivalente* rendendo il metodo di separazione inappropriato in tali condizioni di irraggiamento.

Nella figura 52 sono rappresentati i dati relativi alla colonna BNCT ottenuti con i TLD-100 e per confronto sono inseriti anche i dati ottenuti con i TLD-700 già riportati nel paragrafo 6.2.1.

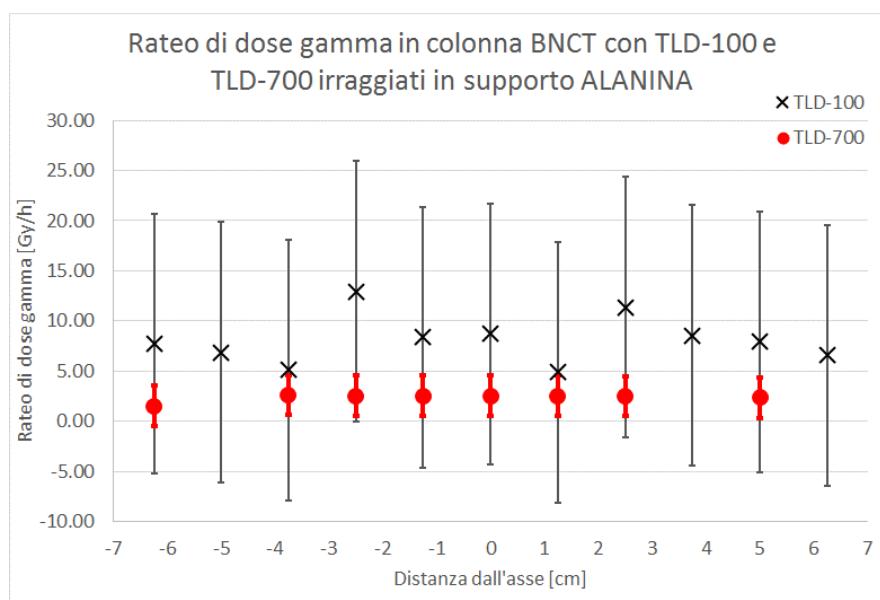


Figura 52: Profilo del rateo di dose gamma in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 e TLD-700 nel supporto ALANINA



- *FLUENZA DI NEUTRONI TERMICI*

Di seguito sono riportate le fluenze termiche in unità arbitrarie ottenute con TLD-100 in supporto ALANINA. Nelle tabelle 23 e 24 sono riportati i risultati ottenuti per il parametro  $h_2$   $\check{R}e\check{z}$  scelto per la determinazione della fluenza termica, rispettivamente nella colonna BNCT e nella HK1.

TLD-100 SUPPORTO ALANINA COLONNA BNCT		
TLD	distanza dall'asse [cm]	$h_2$ Rez
g4	-6.25	6.36E+05
g5	-5.00	1.02E+06
g6	-3.75	1.56E+06
g7	-2.50	1.75E+06
g8	-1.25	2.03E+06
g9	0.00	1.70E+06
d1	1.25	1.77E+06
d2	2.50	1.61E+06
d3	3.75	1.63E+06
d4	5.00	1.08E+06
d5	6.25	8.21E+05

*Tabella 23: Fluenza termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA*

TLD-100 SUPPORTO ALANINA COLONNA HK1		
TLD	distanza dall'asse [cm]	$h_2$ Rez
d6	-6.25	1.46E+05
d7	-5.00	1.25E+06
d8	-3.75	1.48E+07
d9	-2.50	1.67E+07
e1	-1.25	1.80E+07
e2	0.00	1.85E+07
e3	1.25	1.91E+07
e4	2.50	2.19E+07
e5	3.75	1.75E+07
e6	5.00	1.52E+07
	6.25	

*Tabella 24: Fluenza di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA*

Nelle figure 53 e 54 sono rappresentati i dati riportati nelle tabelle rispettivamente per la colonna BNCT e per la colonna HK1. Nelle figure sono stati riportati anche i risultati ottenuti precedentemente in supporto SOTTILE per evidenziarne le eventuali differenze.

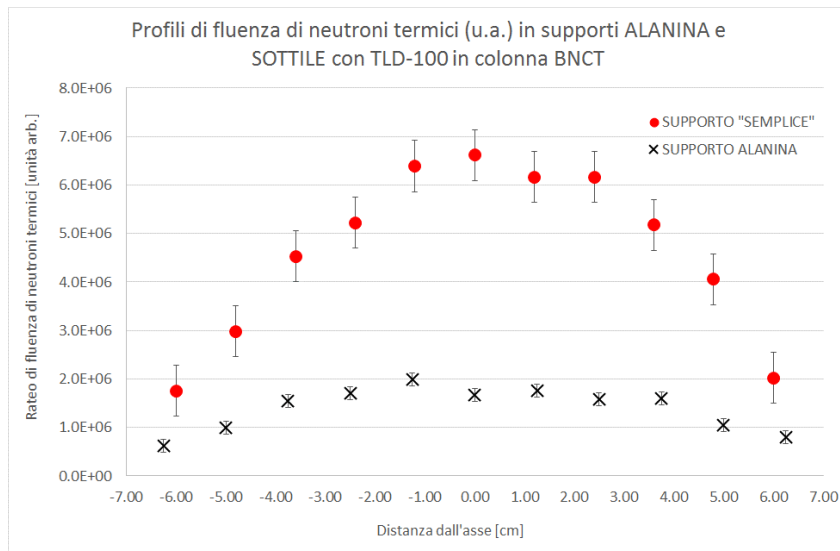


Figura 53: Profilo di fluensa termica in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio moderato della colonna BNCT per i TLD-100 nel supporto ALANINA e SOTTILE

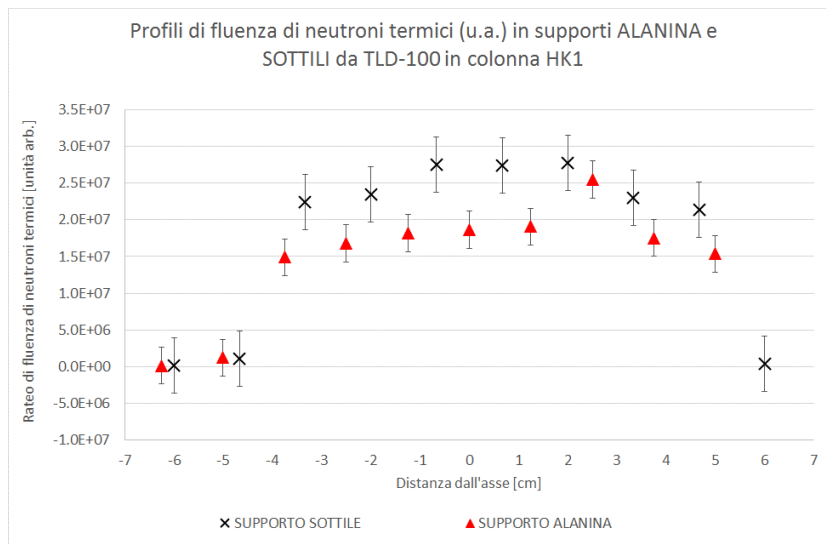


Figura 54: Profilo di fluensa di neutroni termici in unità arbitrarie in funzione della distanza dall'asse del fascio termico della colonna HK1 per i TLD-100 nel supporto ALANINA e SOTTILE

Come già discusso nel capitolo 4 i TLD-100, in questi campi misti di reattore nucleare, possono essere utilizzati sono per valutazioni riguardo alla fluensa termica.

I valori ottenuti con i TLD non sono ancora stati utilizzati in quanto le elaborazioni da parte del gruppo di ricerca delle università di Palermo e Pavia che si occupa dell'alanina non sono ancora terminate. Infatti le operazioni di valutazione e sottrazione del contributo dei neutroni termici richiede opportune calibrazioni dei dosimetri di alanina borata e non borata con radiazione gamma e con neutroni termici. La calibrazione con neutroni termici è ancora in corso e i risultati al momento non sono ancora disponibili.

I dati presentati in questa tesi saranno utilizzati in seguito dal suddetto gruppo di ricerca.

## CONCLUSIONI

In seguito ai risultati presentati in questo lavoro, si può confermare che la valutazione della dose gamma, in campi di radiazione misti n-γ di colonne epitermiche/termiche da reattore nucleare, può essere ottenuta con il metodo presentato. Il metodo prevede l'utilizzo di una sola tipologia di TLD (i TLD-700) adeguatamente calibrati con fotoni senza la necessità di effettuare altre misure di fluenze termiche, per sottrarre il contributo dei neutroni termici nella risposta del dosimetro. Infatti i risultati ottenuti estraendo, dalla risposta dei dosimetri TLD-700 che contengono solo il 0.01% di  $^6\text{LiF}$ , la dose gamma con il metodo proposto e studiato, hanno dimostrato avere una buona consistenza con i risultati ottenuti con dosimetri a gel, nelle stesse geometrie di irraggiamento. Questo ha evidenziato una buona applicabilità del metodo a TLD di questa tipologia. Anche la fluenza di neutroni termici ha dimostrato di poter essere affidabilmente ottenuta con il metodo sopra citato dagli stessi TLD se questi sono stati calibrati ai neutroni termici. Non è stato possibile confrontare i risultati di fluenza termica ottenuti in questo lavoro in quanto tale fluenza non è stata ricavata con nessun altro dosimetro. Infatti le misure dei TLD-700 connesse con quelle fatte con i dosimetri a gel di Fricke avevano lo scopo di valutare la sensibilità dei dosimetri a gel ai neutroni termici e le misure connesse con quelle effettuate con i dosimetri di alanina avrebbero potuto fornire un termine di confronto se le elaborazioni dei dati ottenuti con alanina fossero state completate dal gruppo di ricerca che se ne occupa.

I TLD-100, che contengono il 7.5% di  $^6\text{LiF}$ , non si sono dimostrati adatti a misurare la dose gamma in campi misti come quelli relativi alle due colonne studiate, in cui il rapporto tra dose gamma e fluenza termica è molto basso ( $4.7 \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{cm}^{-2}$  per il fascio BNCT moderato,  $1.2 \cdot 10^{-9} \text{ Gy} \cdot \text{cm}^{-2}$  per il fascio termico della colonna HK1). Infatti in questi dosimetri il contributo all'energia assorbita totale dovuto alla radiazione gamma è trascurabile rispetto a quello dovuto dalle particelle cariche generate dalle interazioni dei neutroni termici con il  $^6\text{Li}$ . Questi dosimetri si sono quindi rivelati adatti a misure di fluenza termica in questi campi misti di reattore nucleare anche se con alcune limitazioni descritte in questa tesi dovute agli elevati ratei di fluenza termica e ai conseguenti rischi di perdita di linearità e danno da radiazione.

Il lavoro effettuato nell'attività di ricerca descritta ha avuto un duplice risultato. Sono state chiarite le potenzialità del metodo proposto per valutare la dose gamma e la fluenza termica con dosimetri a termoluminescenza in un determinato campo di radiazione di reattore nucleare e a illustrare le caratteristiche dei dosimetri che ne permetteranno futuri utilizzi in appropriati esperimenti. Inoltre

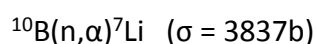
i risultati ottenuti hanno permesso di comprendere meglio gli effetti, all'interno dei materiali attraversati da fasci di neutroni epitermici/termici, dei complessi meccanismi di reazione che sono possibili in campi neutronici.

# APPENDICE

Poiché può essere utile avere a portata di mano informazioni relative alla terapia per cattura neutronica da parte del Boro (BNCT) e sulle caratteristiche del reattore di ricerca LVR-15 del centro di ricerca di Řež (Repubblica Ceca) sono qui riportati i testi a questo riguardo nella tesi triennale di Marco Maria Jacopo Felisi laureato presso l'Università degli Studi di Milano in Aprile 2014.

## I. BNCT

La terapia per cattura neutronica è una tecnica in fase sperimentale per la cura di tumori diffusi e radioresistenti; essa mira a distruggere selettivamente le cellule tumorali con particelle cariche ad elevato LET (Linear Energy Transfer) e RBE (Relative Biological Effectiveness). Il processo in questione è basato sull'utilizzo di particolari composti che si accumulano selettivamente nel tessuto tumorale, ai quali viene legato un isotopo con un'elevata sezione d'urto per i neutroni termici e che produce particelle cariche secondarie. La scelta è ricaduta sull'isotopo  $^{10}\text{B}$  per l'elevata sezione d'urto per neutroni termici della reazione



Le particelle cariche prodotte in questa reazione ( $\alpha$  con energia di 1,47 MeV e nucleo di rinculo  $^7\text{Li}$  con energia di 0,84 MeV,) hanno un *range* di 9-5  $\mu\text{m}$  rispettivamente, ovvero rilasciano tutta l'energia all'interno della cellula stessa.

La terapia che sfrutta i prodotti secondari della reazione tra i neutroni termici e il  $^{10}\text{B}$  prende il nome di Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). Il vantaggio principale di questa terapia rispetto alle terapie convenzionali, come radioterapia e chemioterapia, è che consente di distruggere le cellule tumorali non danneggiando le cellule sane contigue; è quindi particolarmente vantaggioso per i tumori diffusi. Inoltre l'elevata RBE delle particelle generata dalla reazione con il  $^{10}\text{B}$  rende efficace questa terapia per i tumori radioresistenti.

Riguardo a questa terapia, si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il boro nelle quantità necessarie non risulta tossico.
- È importante determinare l'intervallo di tempo che si deve lasciare intercorrere tra la somministrazione del farmaco e l'esposizione del paziente per massimizzare la differenza di concentrazione del  $^{10}\text{B}$  tra cellule tumorali e tessuto sano.

Questa terapia è in fase di sperimentazione e di sviluppo ed è altamente interdisciplinare; sono infatti coinvolti diversi ambiti scientifici, quali medicina, biologia e chimica, per migliorare la selettività del carrier del boro, fisica per lo studio dei metodi dosimetrici che permettono di misurare separatamente le componenti di dose che hanno diverso RBE, ed infine ingegneria per la progettazione delle linee di fascio che permettono di ottenere neutroni con opportuno spettro energetico, per massimizzare il flusso termico alla profondità dei tumori.

## II. REATTORE DA RICERCA LVR-15 DI ŘEŽ (PRAGA)

Il LVR-15 di Řež (Praga-Repubblica Ceca) è un reattore nucleare da ricerca ad acqua leggera, utilizzato in diversi campi di ricerca, dalla fisica alla medicina, dall'ingegneria alla biologia. L'utilizzo delle diverse colonne del reattore è mostrato nella figura 55.

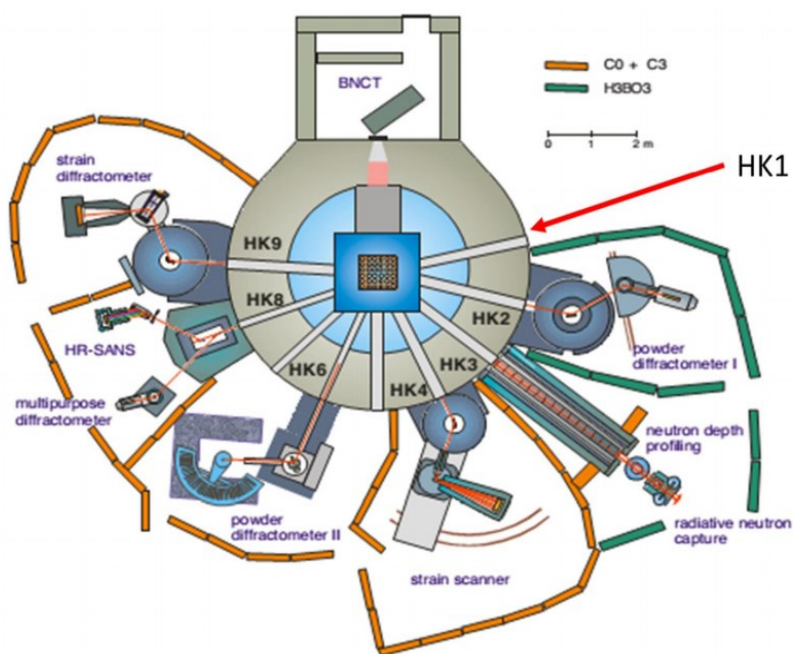


Figura 55: Diverse colonne al reattore LVR-15 di Řež

La linea del fascio epitermico per BNCT è stata realizzata nel 2000 ed è formato da un otturatore interno, un filtro (strati di Al-AlF<sub>3</sub>), un collimatore (Al con Pb) e da un otturatore esterno, come riportato nella figura 56.

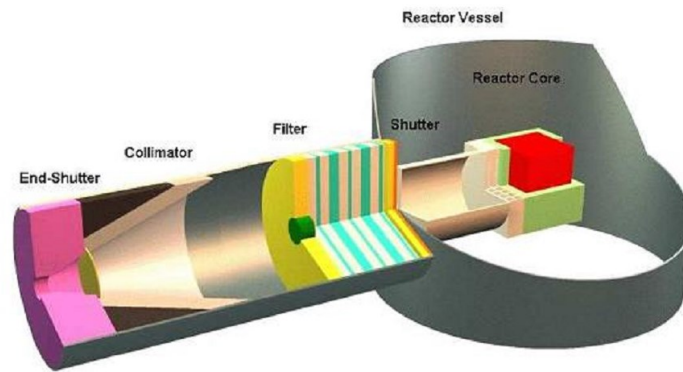


Figura 56: Fascio epitermico al reattore LVR-15 di Řež

Le caratteristiche del fascio sono:

- Rateo di fluenza epitermica:  $6.5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Rateo di fluenza veloci:  $5.5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Rateo di fluenza termica:  $3.8 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

In alcuni irraggiamenti, nella bocca del collimatore del fascio epitermico è stato inserito uno strato moderatore di 2 cm, con lo scopo di fornire un flusso di neutroni termici appropriato per esperimenti su cellule o topi di piccole dimensioni.

I dati sopra riportati si riferiscono ad una potenza del reattore di circa 9 MW. Recentemente sono state effettuate alcune modifiche nella struttura del core in modo da poter utilizzare una potenza lievemente superiore per incrementare il flusso neutronico.

Nella figura 57 è riportato lo spettro misurato dei neutroni per la colonna epitermica precedentemente descritta.

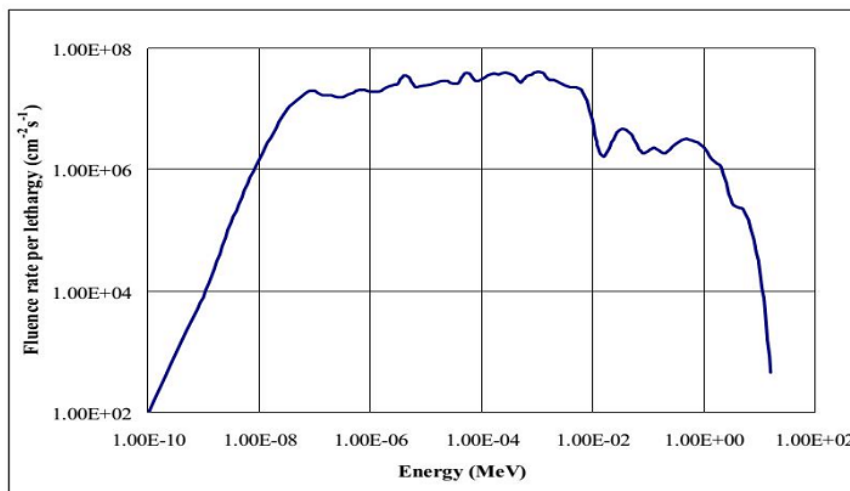


Figura 57: Spettro misurato di neutroni della colonna epitermica del reattore LVR-15 di Řež

# BIBLIOGRAFIA

- 1 Aschan, C., Toivonen, M., Savolainen-Rasmussen, F., 1999. Experimental correction for thermal neutron sensitivity of gamma ray TL dosimeter irradiated at BNCT beams. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 82, 65-69
- 2 Ayyangar, K., Lakshmanan, A. R., Bhuwan Chandra, Ramadas, K., 1974. A comparison of Thermal Neutron and Gamma Ray Sensitivities of Common TLD Materials. *Phys. Med. Biol.* 19, 665-676.
- 3 Baccaro, S., Cemmi, A., Colombi, C., Fiocca, M., Fiorani, O., Gambarini, G., Lietti, B., Perrone, A. and Rosi, G. In phantom dose mapping in neutron capture therapy by means of solid state detectors. *Nucl. Instrum. Meth. B* 213, 666---669 (2004).
- 4 Bartesaghi, G., Burian, J., Gambarini, G., Marek, M., Negri, A., Viererbl, L., 2009. Evaluation of all dose components in the LVR-15 reactor epithermal neutron beam using Fricke gel dosimeter layers. *Appl. Radiat. Isot.* 67, S199–S201.
- 5 Becker, K., 1973. *Solid State Dosimetry* (Boca Raton, FL: CRC Press).
- 6 Burgkhardt, B., Bilski, P., Budzanowski, M., Böttger, R., Eberhardt, K. and Hampel, G., 2006. Application of different TL detectors for the photon dosimetry in mixed radiation fields used for BNCT. *Radiat. Prot. Dosim.* 120, 83-86.
- 7 Cecilia, A., Baccaro, S., Cemmi, A., Colli, V., Gambarini, G., Rossi, G., Scolari, M. Alanine and TLD coupled detectors for fast neutron dose measurements in neutron capture therapy (NCT) . *Radiat. Prot. Dosimetry*. 110, 637e640.
- 8 Gambarini, G., Martini, M., Scacco, A., Raffaglio, C., Sichirollo, A.E., 1997. TL dosimetry in high fluxes of thermal neutrons using variously doped LiF and KMgF<sub>3</sub>. *Radiat. Prot. Dosim.* 70, 175–180.
- 9 Gambarini, G., Klamert, V., Agosteo, S., Birattari, C., Fiocca, M., Gay, S., et al., 2004a. Study of a method based on TLD detectors for in-phantom dosimetry in BNCT. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 110, 631e636.
- 10 Gambarini, G., Colli, V., Gay, S., Petrovich, C., Pirola, L., Rosi, G., 2004b. In-phantom imaging of all dose components in boron neutron capture therapy by means of gel dosimeters. *Appl. Radiat. Isot.* 61, 759e763.
- 11 Gambarini, G., Gallivanone, F., Carrara, M., Nagels, S., Vogtlander, L., Hampel, G., et al., 2008. Study of reliability of TLDs for the photon dose mapping in reactor neutron fields for BNCT. *Radiat. Meas.* 43, 1118e1122.



- 12 Gambarini, G., Bartesaghi, G., Agosteo, S., Vanossi, E., Carrara, M., Borroni, M., 2010a. Determination of gamma dose and thermal neutron fluence in BNCT beams from the TLD-700 glow curve shape. *Radiat. Meas.* 45, 640-642.
- 13 Gambarini, G., Bartesaghi, G., Burian, J., Carrara, M., Marek, M., Negri, A., Pirola, L., Viererbl, L., 2010b. Fast-neutron dose evaluation in BNCT with Fricke gel layer detectors. *Radiat. Meas.* 45, 1398–1401.
- 14 Piesch, E., Burgkhardt, B. and Sayed, A. M. Activation and damage effects in TLD-600 after neutron irradiation. *Nucl. Instrum. Meth.* 157, 179–184 (1978).
- 15 Wang, S. S., Cai, G. G., Zhou, K. Q., Zhou, R. X., 1990. Thermoluminescent response of  ${}^6\text{LiF}(\text{Mg,Cu,P})$  and  ${}^7\text{LiF}(\text{Mg,Cu,P})$  TL chips in neutron and gamma ray mixed radiation fields. *Radiat. Prot. Dosim.*, 33, 247, 250.

# RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare le persone che mi hanno aiutato nella stesura della tesi precisando però che la responsabilità per ogni errore contenuto in questa tesi è mia.

Ringrazio anzitutto il Professore Fabrizio Campi, Relatore; la Professoressa Grazia Gambarini, Correlatore, senza il loro supporto la tesi non esisterebbe.

Proseguo con il Professore Stefano Agosteo, Il Professore Andrea Pola, la Dottoressa Maria Grazia Introini, la Dottoressa Luisella Garlati e la Dottoressa Ornella Tambussi che si sono resi disponibili tutte le volte in cui ho avuto bisogno di un loro aiuto.

Vorrei infine ringraziare le persone a me più care:

La Ljuba e il Babbo per essermi stata vicino e avermi finanziato.

Mihaela che non mi ha fatto perdere la fiducia in me stesso.

I miei amici che hanno cercato in tutti i modi di non farmi studiare.