

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

Problematiche di radioprotezione dell'ambiente nella gestione di carichi di rifiuti di provenienza urbana e industriale destinati all'incenerimento. Analisi dei dati di misura e studio con codici di calcolo



Relatore

prof. Massimo Zucchetti

Relatore esterno:

dott. Loretta Ferrero (FCA)

Correlatore:

prof. Mario De Salve

Candidato
ANDREA CARINI

Ottobre 2018

Sommario

| | |
|---|----|
| Introduzione | 3 |
| 1 La radioprotezione nel trattamento dei materiali solidi destinati all'incenerimento | 5 |
| 2 Concetti di esclusione, esenzione, clearance | 11 |
| 3 Materiali radioattivi: aspetti normativi | 12 |
| 4 Procedure di controllo | 14 |
| 5 Generalità sui rivelatori di più diffuso impiego | 16 |
| 5.1 Problematiche | 16 |
| 5.2 Build up | 17 |
| 5.3 Tipi di rivelatori interessati | 19 |
| 5.3.1 Strumentazione fissa: portali | 20 |
| 5.3.2 Strumentazione portatile | 22 |
| 5.4 Generalità sui rivelatori plastici a scintillazione | 23 |
| 6 Approccio allo studio del problema | 26 |
| 7 MicroShield | 37 |
| 7.1 Descrizione e dettagli tecnici | 37 |
| 7.2 Step di processo | 38 |
| 7.3 Creazione di un caso-studio | 39 |
| 8 Elaborazione dei dati | 49 |
| 8.1 Step 1 : DATABASE | 49 |
| 8.2 Step 2: Carichi in uscita | 50 |
| 8.3 Step 3: Carichi in ingresso | 54 |
| 8.3.1 Configurazione uniforme | 55 |
| 8.3.2 Configurazione concentrata | 56 |
| 9 Proposta di gestione dei carichi in ingresso | 57 |
| 10 Conclusioni | 60 |
| 11 Bibliografia | 61 |
| 12 Appendice | 62 |
| 13 Ringraziamenti | 70 |

Introduzione

Il tema della gestione e smaltimento dei rifiuti urbani ed industriali, negli anni, è diventato sempre più importante a livello nazionale ed internazionale, a causa dell'attuale sistema economico e sociale fondato sulla continua crescita della produzione e del consumo di beni e servizi.

Secondo la direttiva 2008/98/Ce del 19 novembre 2008, il rifiuto viene definito come: "qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi"; in termini meno giuridici, possiamo generalmente definire come "rifiuto" tutti i residui della produzione e del consumo, che si presentano in forma solida o liquida (se raccolti in un contenitore rigido) ed i fanghi. I rifiuti inoltre, da un punto di vista normativo, si distinguono in rifiuti urbani e rifiuti speciali, che a loro volta si dividono in rifiuti pericolosi e non pericolosi. I rifiuti solidi urbani (RSU) sono quelli prodotti dalle famiglie, dalle attività commerciali (alberghi, bar, ristoranti, uffici, negozi, supermercati, etc...), da enti quali ospedali, carceri, caserme e scuole. Essi si distinguono in rifiuti ordinari, pericolosi (pile, batterie, farmaci, lampade al neon, etc...) ed ingombranti (mobili, elettrodomestici, arredi, sanitari, etc...).

I rifiuti speciali sono invece tutti i residui derivanti da attività produttive, suddivisi per varie tipologie, tra cui: rifiuti che per caratteristiche e non pericolosità sono smaltiti come RSU, fanghi di depurazione civile, rifiuti ospedalieri non assimilabili, autodemolizioni, inerti di origine industriale e civile, rifiuti speciali non tossici e nocivi; i rifiuti speciali pericolosi invece, sono quelli che contengono sostanze tossiche in misura superiore alle soglie indicate dalla legge. Non rientrano nella normativa i rifiuti radioattivi, regolamentati a parte.

Le politiche per la gestione e lo smaltimento dei rifiuti sono definite da molti anni da specifiche normative ed indirizzi politici dell'Unione Europea. In particolare, l'UE predilige il riutilizzo o riciclo dei rifiuti e, quando ciò non è disponibile, l'incenerimento presso termovalorizzatori limitando l'impatto ambientale dei fumi prodotti e recuperare energia.

Il termovalorizzatore, detto anche inceneritore, è un impianto industriale che elimina i rifiuti bruciandoli e, con il calore prodotto da questa combustione, produce energia. E' quindi un impianto di combustione a tutti gli effetti, composto da un forno, dove si bruciano i rifiuti provenienti da attività industriali o urbane, da una caldaia ed una turbina che trasforma l'energia termica in energia elettrica. Questi impianti hanno l'obbligo di ridurre l'impatto ambientale causato dalla combustione dei rifiuti, ciò può essere fatto ottimizzando, a livello tecnologico, l'impianto e gestendo al meglio la tipologia di rifiuti in ingresso.

Lo smaltimento di rifiuti radioattivi, provenienti da ambito nucleare, industriale o radioterapico, non avviene in questa tipologia di impianto, ma deve avvenire in appositi siti ad essi destinati.

Tuttavia gli scarti di lavorazione industriale, i rifiuti solidi urbani ed in linea generale ogni rifiuto derivato da attività umane, possono potenzialmente contenere radioisotopi sia artificiali che naturali in concentrazioni radioprotezionisticamente significative. Tali radioisotopi, se inseriti nel ciclo lavorativo, possono portare a contaminazioni dell'ambiente, dei luoghi di lavoro oltre che dei prodotti realizzati con questi scarti. È necessario quindi per le aziende effettuare controlli sugli scarti trasportati dai camion all'atto del ricevimento della merce, per tutelarsi dall' accidentale fusione di materiale radioattivo.

Il presente elaborato riguarda il controllo attuato a carico dei rifiuti destinati all'incenerimento presso un impianto di termovalorizzazione che, nell'ambito delle proprie specifiche autorizzazioni, deve effettuare verifiche per scongiurare la combustione di materiale radioattivo.

1 La radioprotezione nel trattamento dei materiali solidi destinati all'incenerimento

La direttiva 2013/59 Euratom del Consiglio, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti e abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e /2003/122/Euratom, pubblicata sulla gazzetta ufficiale dell'UE il 17/01/2014 ed in fase di recepimento nella legislazione nazionale italiana, affronta direttamente la tematica dell'incenerimento dei materiali.

Nella direttiva sono indicati i valori di concentrazione di radionuclidi applicabili in caso di *allontanamento* di materiali solidi destinati a smaltimento tradizionale o incenerimento e che derivano dall'applicazione di concetti di *clearance* ed *esenzione*, affrontati nel capitolo successivo di questo elaborato.

In particolare tale normativa afferma: “è utile avere i medesimi valori di concentrazione delle attività sia per l'esenzione di pratiche dal controllo regolamentare, sia per l'esenzione di materiali da pratiche autorizzate.

Dopo un esame esauriente, si è giunti alla conclusione che i valori raccomandati nel documento dell'AEIA “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance” (Applicazione dei concetti di esclusione, esenzione ed allontanamento) possono essere utilizzati sia come valori di esenzione standard, in sostituzione dei valori di concentrazione di attività definiti nell'allegato I della direttiva 96/29/Euratom, sia come livelli generali di allontanamento, in sostituzione dei valori raccomandati dalla Commissione nel testo "Radioprotezione n. 122"“.

Nella direttiva 2013/59 Euratom, in particolare nell'allegato VII “criteri di esenzione e di allontanamento”, tabella A parte 1 e parte 2, sono indicati i valori di concentrazione di attività espressi in kBq/kg, che si applicano per l'allontanamento di materiali solidi per il riutilizzo, il riciclo, lo smaltimento tradizionale o l'incenerimento.

La parte 1 tratta i radionuclidi artificiali, la parte 2 riguarda i radionuclidi naturali presenti nei materiali solidi in *equilibrio secolare*¹ con i loro prodotti di filiazione.

¹ L'equilibrio secolare è una condizione fisica relativa ad un isotopo “padre” che decade in un altro isotopo “figlio”; esso si verifica quando la velocità di decadimento del secondo è pari a quella del primo, per cui la quantità dell'isotopo “figlio” rimane costante perché il suo tasso di produzione è uguale al suo tasso di decadimento.

In una catena di decadimento radioattivo, l'equilibrio secolare può verificarsi solo se l'emivita del radionuclide “figlio” è molto più breve del radionuclide “padre”. In un minerale tratto da un giacimento indisturbato per tempi di scala geologica, tutti gli elementi della catena naturale hanno avuto tempo sufficiente per portarsi in condizione di equilibrio secolare con i capostipiti; di conseguenza, per i NORM, l'assunzione di equilibrio secolare è giustificata. Stesso non si può dire sui TENORM in quanto l'uso industriale va a spezzare la naturale catena di decadimento, andando ad aumentare la concentrazione di un isotopo (relativamente alla necessità) rispetto alle condizioni naturali.

Per gli scopi di questo elaborato, che riguardano in particolare il trattamento di rifiuti che possono contenere radionuclidi naturali, si riporta la tabella A parte 2, i cui valori si applicano singolarmente ad ogni nuclide capostipite.

| | |
|---|-----------|
| Radionuclidi naturali della serie di U-238 | 1 kBq/kg |
| Radionuclidi naturali della serie di Th-232 | 1 kBq/kg |
| K-40 | 10 kBq/kg |

Nei rifiuti in ingresso all'impianto di incenerimento, che derivano da svariate attività industriali e dalla raccolta urbana, non è rara la presenza di materiali nella cui composizione sono presenti NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) o TENORM (Technically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material). In questi materiali risultano particolarmente rilevanti le catene di decadimento dell'Uranio 238 e del Torio 232, elementi presenti nella crosta terrestre e quindi, anche in alcuni minerali utilizzati per varie attività industriali non necessariamente rivolte allo sfruttamento delle loro proprietà radioattive.

Nel seguito sono riportate le catene di decadimento con le relative caratteristiche (tempo di dimezzamento e probabilità connesse alla tipologia di decadimento (alfa, beta, gamma) con le rispettive energie).

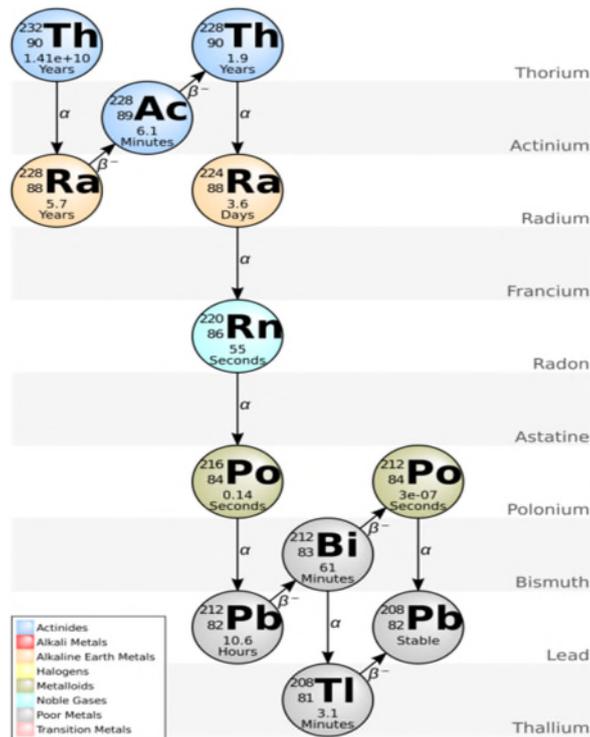


Figura 1: Catena di decadimento del Torio

| Nuclide | Tempo dimezzamento | Energie decadimento alfa [Mev] | % decadimento alfa | Energie decadimento beta [Mev] | % decadimento beta | Energie decadimento gamma [Mev] | % decadimento gamma |
|---------|------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|
| Th 232 | $1,405 \times 10^{10}$ | 3,83 | 0,2 | 0 | 0 | 0,059 | 0,19 |
| | | 3,95 | 23 | 0 | 0 | 0,126 | 0,04 |
| | | 4,01 | 76,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ra 228 | 5,75 anni | 0 | 0 | 0,0389 | 100 | 0,0067 | 6×10^{-5} |
| Ac 228 | 6,13 ore | 0 | 0 | 0,983 | 7 | 0,338 | 11,4 |
| | | 0 | 0 | 1,014 | 6,6 | 0,911 | 27,7 |
| | | 0 | 0 | 1,115 | 3,4 | 0,969 | 16,6 |
| | | 0 | 0 | 1,17 | 32 | 1,588 | 3,5 |
| | | 0 | 0 | 1,74 | 12 | 0 | 0 |
| Th 228 | 1,913 anni | 0 | 0 | 2,08 | 8 | 0 | 0 |
| | | 5,34 | 26,7 | 0 | 0 | 0,084 | 1,19 |
| | | 5,42 | 72,4 | 0 | 0 | 0,132 | 0,11 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,132 | 0,11 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,166 | 0,08 |
| Ra 224 | 3,66 giorni | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,216 | 0,27 |
| | | 5,45 | 4,9 | 0 | 0 | 0,241 | 3,9 |
| | | 5,42 | 72,4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|--------------------|----------------------|-------|------|-------|------|--------|-------|
| Rn 220 | 55,6 secondi | 6,288 | 99,9 | 0 | 0 | 0,55 | 0,07 |
| Po 216 | 0,15 secondi | 6,78 | 100 | 0 | 0 | 0,128 | 0,002 |
| Pb 212 | 10,64 ore | 0 | 0 | 0,158 | 5,2 | 0,239 | 44,6 |
| | | 0 | 0 | 0,334 | 85,1 | 0,3 | 3,4 |
| | | 0 | 0 | 0,573 | 9,9 | 0 | 0 |
| Bi 212 | 60,55 minuti | 6,05 | 25 | 1,59 | 8 | 0,04 | 1 |
| | | 6,09 | 9,6 | 2,246 | 48,4 | 0,727 | 11,8 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,62 | 2,75 |
| Po 212 (64,07%) | 305 nano- secondi | 8,785 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tl 208 (35,93%) | 3,07 minuti | 0 | 0 | 1,28 | 25 | 0,277 | 6,8 |
| | | 0 | 0 | 1,52 | 21 | 0,5108 | 21,6 |
| | | 0 | 0 | 1,8 | 50 | 0,583 | 85,8 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,86 | 12 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,614 | 100 |
| Pb 208 | stabile | | | | | | |

Tabella 1: Caratteristiche di decadimento della catena del Torio232

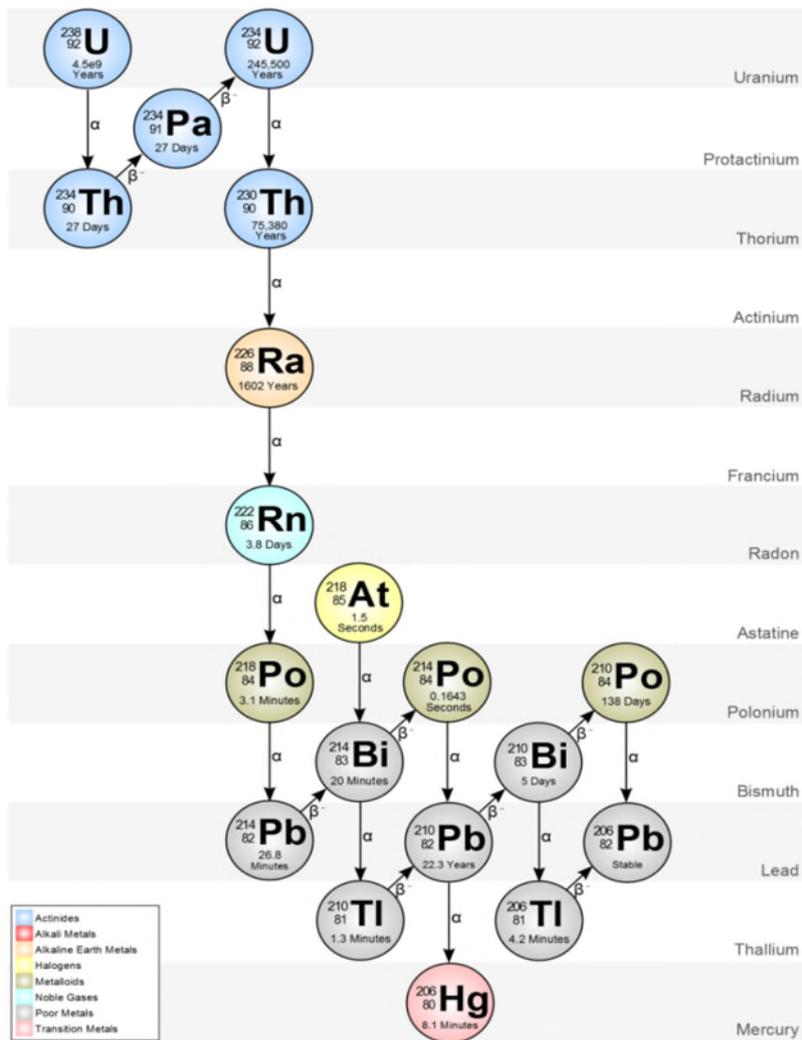


Figura 2: Catena di decadimento dell'Uranio

| Nuclide | Tempo dimezzamento | Energie decadimento alfa [Mev] | % decadimento alfa | Energie decadimento beta [Mev] | % decadimento beta | Energie decadimento gamma [Mev] | % decadimento gamma |
|------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|
| U 238 | 4,468 x10 ⁹ anni | 4,15 | 22,9 | 0 | 0 | 0,0496 | 0 |
| | | 4,2 | 76,8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Th 234 | 24,1 giorni | 0 | 0 | 0,076 | 2,7 | 0,0633 | 3,8 |
| | | 0 | 0 | 0,095 | 6,2 | 0,0924 | 2,7 |
| | | 0 | 0 | 0,096 | 18,6 | 0,0928 | 2,7 |
| | | 0 | 0 | 0,1886 | 72,5 | 0,1128 | 0,24 |
| Pa 234 | 1,17 minuti | 0 | 0 | 2,28 | 98,6 | 0,766 | 0,207 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,001 | 0,59 |
| U 234 | 244,5 anni | 4,72 | 27,4 | 0 | 0 | 0,053 | 0,12 |
| | | 4,77 | 72,3 | 0 | 0 | 0,121 | 0,04 |
| Th 230 | 7,7 x10 ⁴ anni | 4,621 | 23,4 | 0 | 0 | 0,0677 | 0,37 |
| | | 4,688 | 76,2 | 0 | 0 | 0,142 | 0,07 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,144 | 0,045 |
| Ra 226 | 1600 anni | 4,6 | 5,55 | 0 | 0 | 0,186 | 3,28 |
| | | 4,78 | 94,4 | | | | |
| Rn 222 | 3,823 giorni | 5,49 | 99,9 | 0 | 0 | 0,51 | 0,078 |
| Po 218 | 3,05 minuti | 6 | 100 | 0,33 | 0,02 | 0,837 | 0,0011 |
| At 218 (0,02%) | 2 secondi | 6,66 | 6,4 | 0 | 0 | 0,786 | 1,1 |
| | | 7,7 | 89,9 | 0 | 0 | 0,053 | 6,6 |
| | | 6,757 | 3,6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pb 214 (99,98%) | 26,8 minuti | 0 | 0 | 0,67 | 48 | 0,2419 | 7,5 |
| | | 0 | 0 | 0,73 | 42,5 | 0,295 | 19,2 |
| | | 0 | 0 | 1,03 | 6,3 | 0,352 | 37,1 |
| Bi 214 | 19,9 minuti | 5,45 | 0,012 | 1,42 | 8,3 | 0,609 | 46,1 |
| | | 5,51 | 0,008 | 1,505 | 17,6 | 1,12 | 15 |
| | | 0 | 0 | 1,54 | 17,9 | 1,765 | 15,9 |
| | | 0 | 0 | 3,27 | 17,7 | 2,204 | 5 |
| Po 214 (99,979%) | 164 picosecondi | 7,687 | 100 | 0 | 0 | 0,7997 | 0,01 |
| Tl 210 (0,021%) | 1,3 minuti | 0 | 0 | 1,32 | 25 | 0,2918 | 79,1 |
| | | 0 | 0 | 1,87 | 56 | 0,7997 | 99 |
| | | 0 | 0 | 2,34 | 29 | 0,86 | 6,9 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,11 | 6,9 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,21 | 17 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,31 | 21 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,41 | 4,9 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,01 | 6,9 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,09 | 4,9 |
| Pb 210 | 22,3 anni | 3,72 | 0,000002 | 0,016 | 80 | 0,0465 | 4 |
| | | 0 | 0 | 0,063 | 20 | 0 | 0 |
| Bi 210 | 5,01 giorni | 4,65 | 0,00007 | 1,161 | 100 | 0 | 0 |
| Po 210 | 138,378 giorni | 5,305 | 100 | 0 | 0 | 0,802 | 0,0011 |
| Pb 206 | stabile | | | | | | |

Tabella 2: Caratteristiche di decadimento della catena del Uranio238

2 Concetti di esclusione, esenzione, clearance

La Basic Safety Standards (BSS) stabilisce i requisiti per la protezione contro i rischi associati all'esposizione alle radiazioni ionizzanti e si occupa di regolare le pratiche lavorative per cui l'impatto radiologico dovuto a "Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)" o a "Technically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (TENORM)" non sia trascurabile.

La BSS offre la possibilità, alle autorità nazionali competenti, di esimere dai requisiti della propria direttiva quei materiali destinati al riutilizzo, riciclaggio o smaltimento, se il loro contenuto di radioattività fosse al di sotto dei cosiddetti "livelli di clearance".

La BSS si rifà ai concetti di esclusione, esenzione e allontanamento che vengono di seguito illustrati:

- Il concetto di esclusione è riferito alla decisione secondo cui il sistema regolatorio non può essere applicato a determinate fonti di esposizione, perché eccessivamente difficoltoso o irrealistico.
- Il concetto di esenzione si applica alle sorgenti di radiazione e/o alle pratiche che non rientrano nel sistema regolatorio: al di sotto di determinati livelli di rischio, l'inserimento nel sistema regolatorio è del tutto inefficiente o persino dannoso da un punto di vista sociale.
- Il concetto di clearance (livello di allontanamento) si applica a sorgenti all'interno del sistema regolatorio, ma che ne possono essere escluse perché presentano rischi irrilevanti e sulle quali, pertanto il sistema regolatorio non si applica più.

I valori relativi a questi concetti derivano da simulazioni, effettuate secondo le guide tecniche date dall'EURATOM, di scenari di impatto ambientale particolarmente gravosi.

Tali valori devono essere applicati a tutte quelle attività che si occupano della gestione di carichi radioattivi ed è necessario che essi vengano accompagnati da bolle identificative che ne definiscano il contenuto ed indichino quali concetti (esclusione, esenzione ed allontanamento) sono stati utilizzati.

Non è raro che l'impianto di termovalorizzazione, che non si occupa di rifiuti radioattivi, si imbatta in carichi in ingresso che presentano un'anomalia radiometrica non segnalata dalla bolla di accompagnamento. In questi casi, sebbene tali concetti non siano propriamente applicati all'impianto di termovalorizzazione, esso si rifà ai valori dei livelli di allontanamento stabiliti dalla BSS.

3 Materiali radioattivi: aspetti normativi

L'utilizzo di energia nucleare in Europa è gestita dal 1957 dalla comunità europea dell'energia atomica (EURATOM), un ente legale separato dall'UE. L'unione europea, attraverso l'EURATOM, fornisce le direttive che gli stati membri hanno compito di implementare come leggi nazionali.

Il quadro legislativo in Italia, per la gestione di materiali radioattivi destinati all'allontanamento, è attualmente regolato:

- dal decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230, recante attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 2006/117/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti e 2009/71/Euratom, in materia di sicurezza nucleare degli impianti nucleari e 2011/70/Euratom in materia di gestione sicura del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi derivanti da attività civili;
- dal decreto-legge 14 novembre 2003, n. 314 convertito, con modificazioni, nella legge 24 dicembre 2003, n. 368 recante “Disposizioni urgenti per la raccolta lo smaltimento e lo stoccaggio, in condizioni di massima sicurezza dei rifiuti radioattivi”;
- dal decreto legislativo 6 febbraio 2007, n. 52, recante “Attuazione della direttiva 2003/122/CE Euratom sul controllo delle sorgenti radioattive sigillate ad alta attività e delle sorgenti orfane”;
- dal decreto legislativo 20 febbraio 2009, n. 23 recante “Attuazione della direttiva 2006/117/Euratom, relativa alla sorveglianza e al controllo delle spedizioni di rifiuti radioattivi e di combustibile nucleare esaurito”;
- dalla legge 23 luglio 2009, n. 99 e s.m.i. recante “Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia” e, in particolare, l'articolo 29 con il quale è stata istituita l'Agenzia per la sicurezza nucleare;
- dal decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31, recante la disciplina dei sistemi di stoccaggio del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi, nonché benefici economici, a norma dell'articolo 25 della legge 23 luglio 2009, n. 99, modificato dal decreto legislativo 23 marzo 2011, n. 41, dal decreto-legge 31 marzo 2011, n. 34 convertito con modificazioni dalla legge 26 maggio 2011, n.75 e dal decreto-legge 24 gennaio 2012, n. 1 convertito con modificazioni dalla legge 24 marzo 2012, n. 27;
- dalla legge n. 75/2011 che ha modificato le previsioni contenute nella legge n. 99/2009 e nel decreto legislativo n. 31/2010, come emendato dal decreto legislativo n. 41/2011, sancendo -

a seguito degli esiti del Referendum del giugno 2011 - l'abbandono dello sviluppo nucleare in Italia;

- dalla legge 24 marzo 2012 n. 27 che, allo scopo di accelerare le attività di decommissioning sui siti nucleari, ha previsto l'espletamento di una singola procedura di autorizzazione (disciplinata dall'articolo 24) che tenga in debita considerazione anche la posizione delle autorità locali coinvolte;
- dal decreto legislativo n. 45/2014 con cui è stata recepita in Italia la direttiva 2011/70/Euratom del Consiglio, del 19 luglio 2011, che istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi;
- dal decreto 7 agosto 2015 del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e del Ministro dello sviluppo economico "Classificazione dei rifiuti radioattivi, ai sensi dell'art. 5 del decreto legislativo 4 marzo 2014, n.45" che stabilisce una nuova classificazione dei rifiuti radioattivi, sostituendo quella di cui alla Guida Tecnica n. 26 dell'ISPRA;
- dal decreto 8 settembre 2017 del Ministro dello sviluppo economico, del Ministro dell'Interno e del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare recante "Requisiti di protezione fisica passiva e modalità di redazione dei piani di protezione fisica".

4 Procedure di controllo

L'impianto di termovalorizzazione studiato, prima di poter incenerire qualsiasi carico contenente scarti di lavorazione industriale, rifiuti solidi urbani o comunque ogni rifiuto derivato da attività umane, deve accertarsi dell'assenza di anomalie radiometriche potenzialmente causata da materiali contaminati o sorgenti radioattive celate nei carichi, in modo da non contaminare l'ambiente.

Per fare ciò, l'azienda segue un protocollo di accettazione dei carichi ed avvio alla lavorazione che prevede:

1. passaggio del veicolo in ingresso, contenente i materiali da trattare, attraverso un portale radiometrico fisso che esegue una misura qualitativa tipo "passa/non passa" [vedi paragrafo 5.3.1];
2. in caso di assenza di anomalia radiometrica, i rifiuti vengono accettati e destinati ai trattamenti successivi;
3. nel caso in cui invece si rilevasse un'anomalia radiometrica, si mettono in atto ulteriori opzioni di verifica che comprendono:
 - altri 3 passaggi di verifica del camion attraverso il portale (invertendo i sensi di marcia);
 - misura manuale della dose emergente dalle sponde del carico effettuata mediante rateometro portatile.

Lo scopo dell'approfondimento è quello di ottenere dati utili a stabilire, con ragionevole grado di confidenza, le azioni successive, che possono comprendere l'avvio alla lavorazione o il fermo del carico e del veicolo. Per fare ciò, l'azienda si appoggia alla consulenza specifica da parte di *esperti qualificati*² di secondo o terzo grado.

Quando il carico non viene accettato, il suo fermo comporta un danno economico sia per il produttore, in quanto viene confiscato temporaneamente il mezzo, sia per l'impianto di termovalorizzazione,

² Gli Esperti Qualificati sono professionisti abilitati al controllo e alla sorveglianza delle radiazioni ionizzanti ai fini della protezione dei lavoratori e della popolazione. Essi sono iscritti in un elenco nazionale tenuto dal Ministero del Lavoro, ripartito in tre diversi gradi di abilitazione che definiscono gli ambiti di competenza tecnica:

1° grado: apparecchi radiologici che accelerano elettroni con tensione massima al tubo inferiore a 400 kV;

2° grado: macchine radiogene che accelerano elettroni ad energia compresa tra 400 keV e 10 MeV e materie radioattive, comprese le sorgenti di neutroni la cui produzione media nel tempo, su tutto l'angolo solido, sia non superiore a 104 neutroni al secondo;

3° grado: impianti nucleari, trattamento di combustibili irradiati, fabbricazione o preparazione di materie fissili speciali, combustibili nucleari e sorgenti diverse da quelle comprese nelle competenze del grado precedente.

tenuto conto che la merce bloccata causa l'occupazione di spazi utili alla ricezione di altri carichi ed inoltre è necessario che l'impianto dia comunicazione agli enti di controllo esterno (ARPA, ASL).

Le attività di bonifica dei carichi necessitano della predisposizione di piani dedicati volti al rinvenimento della sorgente o del materiale contaminato oppure, in caso di carichi omogenei, al prelievo di campioni in numerosità statisticamente significativa sui quali effettuare un'analisi qualitativa e quantitativa eseguibile necessariamente con strumentazione di laboratorio presso centri qualificati.

L'accuratezza con la quale possono essere gestiti i dati delle verifiche preliminari (dati del portale e misurazioni manuali) è uno strumento utile ad individuare una metodologia alternativa all'analisi di laboratorio, che presenta diversi problemi a riguardo:

- la manipolazione del carico, per la raccolta di un campione, deve essere effettuata da personale autorizzato e competente;
- il campione prelevato deve essere significativo del carico stesso, cosa che molto spesso è difficile ottenere, nel caso in cui la sorgente NORM non sia fisicamente distinguibile dal resto del carico;
- costo economico associato all'analisi di laboratorio che richiede l'uso di apparecchi appositi e personale tecnico specializzato;
- notevoli tempi di attesa per ottenerne gli esiti.

Da quanto precedentemente esposto l'avvio alla lavorazione di un carico, in cui si stata segnalata un'anomalia radiometrica, può essere effettuato solo qualora venisse ragionevolmente esclusa la presenza di una sorgente radioattiva artificiale oppure l'anomalia fosse dovuta a NORM con concentrazioni al di sotto dei valori indicati nella tabella 1.

5 Generalità sui rivelatori di più diffuso impiego

5.1 Problematiche

Le misure di uno strumento impiegato nella rivelazione di radiazioni penetranti in prossimità di un carico sono essenzialmente condizionate dai seguenti fattori:

1. *Radiazione di fondo*: La radiazione di fondo è dovuta alla presenza di radionuclidi naturali nel terreno e nei materiali da costruzione presenti in prossimità della postazione di misura, nonché dalla radiazione di origine cosmica. I valori tipici della radiazione di fondo possono variare da 60 nGy/h a 200 nGy/h in funzione delle caratteristiche geologiche e dell'altitudine del luogo, inoltre, in condizioni meteorologiche costanti, il suo valore non subisce variazioni significative nell'arco di alcuni secondi. Il contributo dato a tale irradiazione dai radionuclidi naturali aerodispersi, principalmente discendenti da Radon 220 e Radon 222, ammonta normalmente ad alcuni nGy/h ed è conseguentemente trascurabile dal punto di vista radiometrico. Le precipitazioni, abbattendo al suolo una frazione rilevante del particolato atmosferico al quale tali radionuclidi sono associati, possono però provocare temporanei innalzamenti del valore di rateo di dose in aria, specie nelle fasi iniziali delle precipitazioni stesse, anche per valori non trascurabili, con aumenti fino al 30% del valore rilevabile in condizioni di tempo stabile.
2. *Schermaggio della radiazione di fondo da parte del carico*: Il contenuto dei carichi consiste, di norma, in materiali che hanno capacità non trascurabile di attenuazione della radiazione incidente, di conseguenza la radiazione di fondo è intercettata ed attenuata, nelle posizioni di misura circostanti un carico, in funzione del contenuto, della sua geometria e della posizione di misura stessa. Una rivelazione effettuata a contatto di un carico, in condizioni in cui può essere assimilato a semispazio infinito ed omogeneo, può fornire, in assenza di contaminazione, valori prossimi alla metà di quanto rilevabile in assenza del carico. Questo perché parte del flusso di fotoni indirizzato verso il rivelatore viene eliminato in quanto intercettato dal carico stesso (è normale un'attenuazione dei valori di irradiazione per circa il 30 – 40 %), inoltre è normale una variazione di fondo, in varie posizioni attorno al mezzo, conseguente alla disomogeneità del carico trasportato o della geometria di posizionamento del contenitore di trasporto.

3. *Irradiazione da parte del contenuto del carico esaminato*: Le sostanze radioattive contenute in un carico offrono, in un punto di misura esterno al carico stesso, un contributo di irradiazione condizionato essenzialmente dai seguenti fattori:
- tipologia della sorgente e la sua attività: se la sorgente fosse di tipo α sarebbe praticamente impossibile per i rivelatori individuarne la presenza; se invece fosse di tipo β e γ la rivelazione sarebbe possibile e dipenderebbe dall'efficienza dei rivelatori alle energie delle radiazioni;
 - assorbimento della radiazione emessa dalla sorgente da parte del carico frapposto fra il rivelatore e la sorgente stessa;
 - Coefficienti di diffusione ed accumulazione (*build up*) della radiazione da parte del carico.

La complessa situazione descritta impedisce di individuare univocamente indicatori da usare in costanza temporale e per ogni situazione, ma richiede in ogni caso un esame comparato dei diversi fattori fisici di interesse.

5.2 Build up

In condizioni di “buona geometria” l'attenuazione di un fascio di raggi γ monoenergetici, nell'attraversare uno spessore r di un materiale assorbitore omogeneo, segue la semplice legge esponenziale:

$$I = I_0 * e^{-\mu r}$$

dove I_0 rappresenta l'intensità del fascio (o rateo di dose) a monte dell'assorbitore e μ [cm^{-1}] rappresenta il coefficiente di attenuazione lineare del mezzo attraversato ed è pari alla somma di μ_{τ} (attenuazione lineare per effetto fotoelettrico), μ_{σ} (attenuazione lineare per effetto Compton) e μ_k (attenuazione lineare per produzione di coppie).

Tale relazione non risulta valida qualora lo spessore di assorbitore attraversato fosse notevole se confrontato con il libero cammino medio della radiazione.

Spesso le misure non possono essere condotte in buona geometria ed i rivelatori vengono investiti anche da fotoni che hanno subito diffusione; molti sistemi, tra cui i portali, non sono in grado di discriminare l'energia della radiazione incidente ed i segnali ottenuti risultano, pertanto, maggiori di quelli attesi.

La legge di attenuazione lineare nel caso di “cattiva geometria” è data da:

$$I = B(r, E_\gamma) * I_0 * e^{-\mu r}$$

dove il termine $B(r, E_\gamma) \geq 1$ è il fattore di accrescimento o di build-up.

La relazione della densità di flusso, ad una distanza r dalla sorgente immersa in un unico mezzo omogeneo infinitamente esteso, si può scrivere come:

$$\varphi = B(E, \mu r) * \frac{S * e^{-\mu r}}{4\pi r^2}$$

dove S è l’attività della sorgente ed il termine $1/4\pi r^2$ tiene conto dell’attenuazione geometrica dovuta all’effetto della distanza; la quantità $\frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2}$ viene denominata “point kernel” e costituisce il nucleo di partenza della trattazione differenziale delle sorgenti estese.

Il valore di B dipende dal tipo di rivelatore che influenza il peso relativo delle componenti secondarie e primarie in base alle condizioni di schermatura della sorgente e alla geometria.

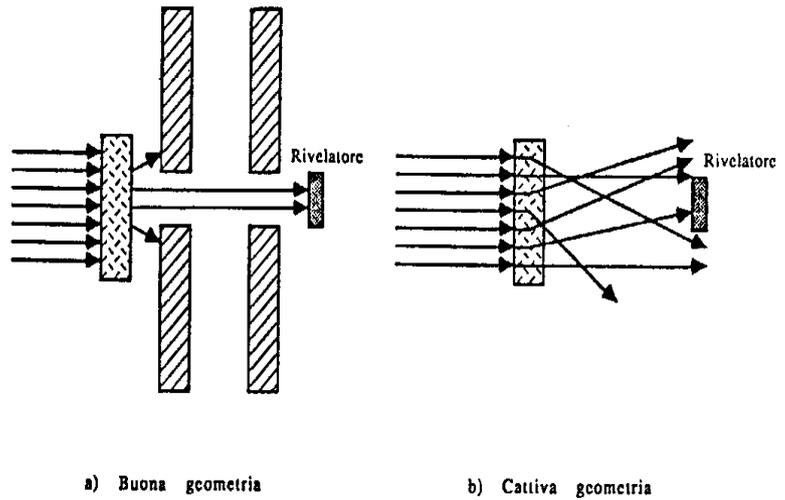
Esistono diverse formulazioni di B relative alle varie grandezze fisiche d’interesse (flusso di fotoni, dose, etc...), ad esempio per la dose assorbita si ha:

$$B_D = \frac{\int D(E, \mu, r) dE}{\int D_0(E, \mu, r) dE}$$

dove $D(E, \mu, r)$ rappresenta la dose assorbita in condizioni reali alla profondità r e $D_0(E, \mu, r)$ la dose assorbita in condizioni di buona geometria. Analoghe relazioni possono essere scritte per le altre grandezze citate.

Il calcolo esatto dei fattori di build-up è particolarmente complesso nel caso di schermi eterogenei. In linea di principio, riferendosi ad una sorgente puntiforme di attività A posta dentro un contenitore di spessore S_{cont} , schermata con un materiale (piombo e/o ferro) di spessore S_{sch} , inserito all’interno di un veicolo avente pareti di spessore S_{parete} , carico di materiale assorbente per uno spessore S_{ass} , il valore di rateo di dose atteso ad una distanza d dalla sorgente stessa è pari a:

Figura 3: Schema di misure condotte in buona e cattiva geometria



$$D_x = \Gamma(x) * \frac{1}{d^2} * A * e^{-[\mu_{cont} * S_{cont} + \mu_{sch} * S_{sch} + \mu_{Fe} * S_{parete} + \mu_{ass} * S_{ass}]} B$$

dove $\Gamma(x)$ è la costante γ specifica dell'isotopo [$\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{Bq})$] e B è il fattore di “build-up combinato”, complessivo per lo schermo eterogeneo composto dai quattro materiali schermanti (contenitore, schermatura sorgente, pareti del camion, carico del cassone).

Per la scelta più opportuna del valore di B non è possibile fornire un'espressione valida per tutti i casi, dipendendo essa dalla mutua posizione e densità dei materiali schermanti.

Una procedura approssimata permette di scrivere B come:

$$B = B_{cont} * B_{sch} * B_{fe} * B_{car}$$

Quest'approssimazione è ammissibile nel caso in cui i materiali si trovino disposti in ordine decrescente in base al loro numero atomico.

In altri casi occorrerebbe invece assumere, per il build-up combinato, il valore di B che si otterrebbe se tutto lo schermo fosse costituito da un unico materiale di volta in volta scelto opportunamente a seconda della posizione degli altri componenti del sistema rispetto alla sorgente.

5.3 Tipi di rivelatori interessati

La rivelazione delle anomalie radiometriche, associabili a radionuclidi presenti nei carichi, non è tesa all'individuazione dei singoli radioisotopi, ma a fornire indicazioni sull'eventuale necessità di eseguire analisi più approfondite. Ciò può essere effettuato essenzialmente impiegando:

- sistemi di rivelazione fissi “a portale”;
- strumentazione portatile analoga a quella utilizzata in radioprotezione.

5.3.1 Strumentazione fissa: portali

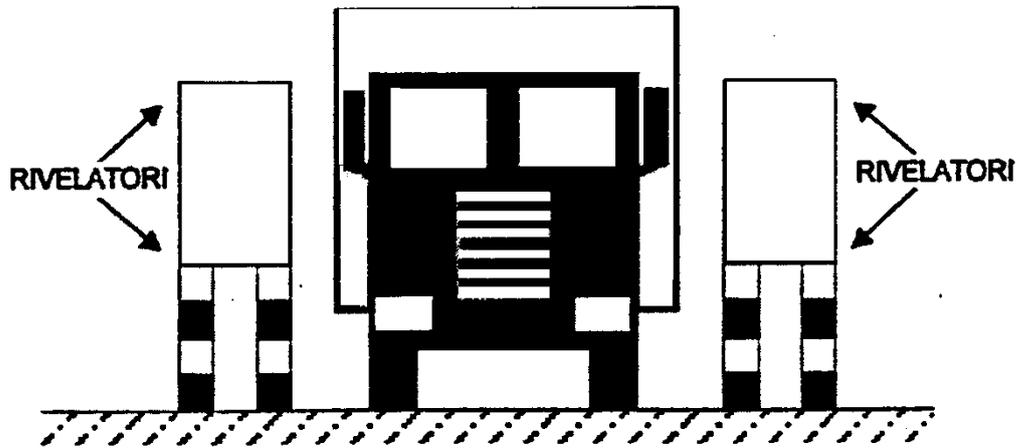


Figura 4: Vista frontale di un sistema di rivelatori "a portale"



Figura 5: Vista in pianta di un sistema di rivelatori "a portale"

I sistemi comunemente detti "portali", che realizzano una rivelazione automatica, si basano sull'utilizzo di rivelatori ad alta efficienza (generalmente scintillatori) collegati ad un'opportuna unità elettronica di controllo con un programma di analisi che gestisce le misure, gli allarmi e la registrazione dei risultati.

I rivelatori sono di norma almeno due ubicati in posizione simmetrica rispetto al contenitore del carico; a volte può essere presente un terzo rivelatore a quota maggiore ed in posizione affacciata al suolo, adibito al controllo della parte superiore del carico, spesso scoperta.

I vantaggi di questo metodo consistono nella non dipendenza dal fattore umano e nella capacità dei software di tenere conto delle variabili legate al fondo naturale in quanto è il portale stesso a valutare la radiazione di fondo.

La misura può essere eseguita sia in modo dinamico (mentre il veicolo transita attraverso il portale), sia in modo statico (a veicolo fermo, ad esempio sulla pesa).

Il vantaggio del metodo dinamico è che, a prescindere dalla posizione della sorgente all'interno del carico, essa passerà comunque ad una distanza minima da uno dei rivelatori e sarà schermata, rispetto al rivelatore più favorevole, da non più di 120 cm di materiale (la larghezza del piano di carico degli autocarri è di solito pari a 240 cm).



Figura 6: Esempio di rivelatore "a portale" che effettua rivelazione anche dall'alto

La misura statica compensa in parte lo svantaggio geometrico con tempi di integrazione più lunghi. I rivelatori utilizzati devono possedere le seguenti caratteristiche:

- ✓ grande superficie e spessore adeguato per ottimizzare l'efficienza delle energie tipiche della radiazione diffusa, ad esempio il rivelatore può essere di tipo plastico a scintillazione, con spessore che va da 5 a 7 cm ed una superficie di 1 m²;
- ✓ essere dotati di schermi contro la radiazione di fondo nei lati non interessati alla misura;
- ✓ presentare robustezza meccanica e resistenza ai fenomeni climatici;
- ✓ aggiornare con continuità i valori di fondo ambientale, valutandone il valor medio per intervalli di tempo non superiori a 15 minuti e tenere conto dell'abbattimento del fondo stesso causato dal transito del veicolo;
- ✓ riconoscere l'avvicinarsi dei veicoli con sensori di prossimità, regolare una soglia di allarme basata sul fondo di riferimento ed in caso fornire un'opportuna segnalazione;
- ✓ avere sensibilità maggiore di 50 kcps/(μGy/h) riferiti al ¹³⁷Cs, garantendo la segnalazione di misurazioni al di sopra della soglia fissata secondo algoritmi tipici di ogni sistema.

Inoltre, il programma di analisi deve provvedere alla registrazione dei valori di fondo ambientale, alle impostazioni della soglia di allarme, alle analisi dei valori misurati sul carico ed alla registrazione di un rapporto di prova.

Alcuni sistemi sono anche in grado di fornire indicazioni automatiche sulla possibile localizzazione dell'eventuale sorgente all'interno del volume del carico.

Questa localizzazione è realizzabile, in base alla dislocazione rispetto all'asse trasversale del piano di carico, confrontando i valori di conteggio forniti dai rivelatori posizionati a destra e a sinistra del

veicolo; inoltre, se sono presenti due rivelatori per lato, con lo stesso metodo è possibile risalire ad una probabile quota.

Per l'indicazione della posizione della sorgente nel senso longitudinale, alcuni sistemi eseguono il controllo dei veicoli in transito in modo da far risalire il valore di conteggio massimo registrato ad un determinato istante; collegando questo con la velocità del veicolo ed il tempo totale di transito, essi forniscono una probabile dislocazione spaziale.

Per quanto riguarda gli errori associati, sono distinguibili diverse cause di incertezza:

- errore di disomogeneità: il sistema deve compensare l'abbattimento del fondo ambientale causato dalla presenza del carico, deve cioè riconoscere correttamente la presenza di segnali superiori al fondo di riferimento, ma che possono essere inferiori al fondo ambientale stesso. La presenza di carichi fortemente disomogenei può essere causa di falsi allarmi ripetibili, che possono venire eliminati unicamente regolando il sistema diversamente;
- errore dovuto a condizioni logistiche: esso è frequentemente causato dalla prolungata permanenza di veicoli carichi nelle vicinanze della stazione di misura e di conseguenza, i rivelatori stimano un valore di fondo ambientale più basso del reale, regolando in modo errato la soglia di allarme. In seguito all'allontanamento del veicolo "di disturbo", il transito di un secondo mezzo potrebbe quindi dare luogo ad un falso allarme;
- errore dovuto a fattori meteorologici: come già discusso in precedenza, il fondo naturale viene alterato da forti precipitazioni atmosferiche soprattutto nelle loro fasi iniziali. Per ovviare al problema occorre generalmente "azzerare" i sistemi facendo apprendere ai rivelatori un nuovo fondo. Al termine delle precipitazioni le condizioni atmosferiche ritornano alla normalità, generalmente con transitori di durata superiore a quelli della fase di peggioramento; in questo caso i sistemi sono in grado di adeguare automaticamente i valori di fondo;
- errore puramente statistico: è associato ad allarmi segnalati in conseguenza delle fluttuazioni statistiche dei valori di fondo e di misura, difficilmente ripetibili, e pertanto non confermati dalla ripetizione del controllo.

5.3.2 Strumentazione portatile

Sono ritenuti adatti tutti i rivelatori di radiazioni ionizzanti X e γ che abbiano un'indicazione della misura di rateo di dose in aria, conteggi al secondo o comunque un'unità di misura ad essi correlabile. Per lo scopo sono normalmente utilizzati rivelatori a gas (camere di ionizzazione, contatori proporzionali) o materiali scintillatori (organici o inorganici come il NaI(Tl)).

Gli apparecchi utilizzati devono possedere le seguenti caratteristiche:

- ✓ rilevare radiazioni di energia compresa tra 40 keV ed 1,3 MeV;
- ✓ rilevare ratei di dose netti compresi tra 0,05 $\mu\text{Gy/h}$ ed 1 mGy/h con una sensibilità di 0,02 $\mu\text{Gy/h}$;
- ✓ essere sottoposti a periodici controlli di taratura presso centri autorizzati e a controlli di buon funzionamento con l'impiego di sorgenti di prova in geometria ripetibile.

Per quanto riguarda gli errori associati alla misura, è necessario che la statistica di conteggio garantisca un valore non maggiore del 20%, con un rateo di dose in aria paragonabile al fondo naturale ($\approx 0,1 \mu\text{Gy/h}$) in presenza di uno spettro energetico tipico di quest'ultimo; il tutto con un livello di confidenza del 95% e tempi di misura di 3 s.



Figura 7: Esempi di strumentazione portatile

5.4 Generalità sui rivelatori plastici a scintillazione

Il processo di fluorescenza in un composto organico deriva dalle transizioni nei livelli energetici strutturali di singole molecole e pertanto può essere osservato, per una data specie molecolare, indipendentemente dallo stato fisico. Per esempio, l'antracene presenta il fenomeno di fluorescenza sia sotto forma di solido cristallino, sia di vapore, sia come parte di soluzioni più complesse; diverso rispetto ai composti inorganici, come lo ioduro di sodio, per i quali invece, per il processo di scintillazione, è necessaria una regolare struttura cristallina.

Una gran parte degli scintillatori organici si basa sull'impiego di molecole con particolari proprietà di simmetria derivanti dalla struttura elettronica "π", mostrata nella figura seguente.

L'energia può essere assorbita dalle molecole eccitando la configurazione elettronica in ciascuno dei possibili stati eccitati. Per le molecole costituenti uno scintillatore il gap energetico tra S_1 ed S_2 è di 3 o 4 eV, mentre il gap tra gli stati superiori è solitamente inferiore.

Ognuno dei livelli energetici è a sua volta suddiviso in una serie di livelli (di circa 0,15 eV) che corrispondono a diversi stati vibrazionali della molecola; lo stato S_{00} corrisponde al più basso stato vibrazionale del livello elettronico fondamentale.

Nel caso di uno scintillatore il processo di assorbimento (schematizzato dalle frecce puntate verso l'alto) può essere causato dalla cessione dell'energia cinetica da parte di una

particella carica incidente; gli stati elettronici vengono così eccitati e poi, in alcuni picosecondi, sono velocemente diseccitati allo stato S_1 attraverso perdita di energia con processo di conversione interna. Inoltre, ogni stato vibrazionale con energia in eccesso (come S_{11} e S_{12}), non essendo in equilibrio termico con i suoi vicini, perde nuovamente energia. L'effetto finale, quindi, del processo di eccitazione in un cristallo organico è quello di produrre, dopo un tempo trascurabile, una popolazione di molecole eccitate nello stato S_{10} . Successivamente, durante la transizione tra il livello S_{10} ed un livello vibrazionale dello stato fondamentale, viene emessa la luce di scintillazione (o fluorescenza immediata). L'intensità della luce di fluorescenza al tempo t , seguente l'eccitazione, sarà:

$$I = I_0 e^{-t/\tau}$$

dove τ rappresenta il tempo di decadimento di fluorescenza del livello S_{10} .

Gli scintillatori organici, specie se di grandi dimensioni, possono non essere trasparenti alla loro stessa fluorescenza di emissione; ciò avviene perché vi è una piccola sovrapposizione tra l'assorbimento ottico e lo spettro di emissione e questo, di conseguenza, porta ad un piccolo autoassorbimento della fluorescenza.

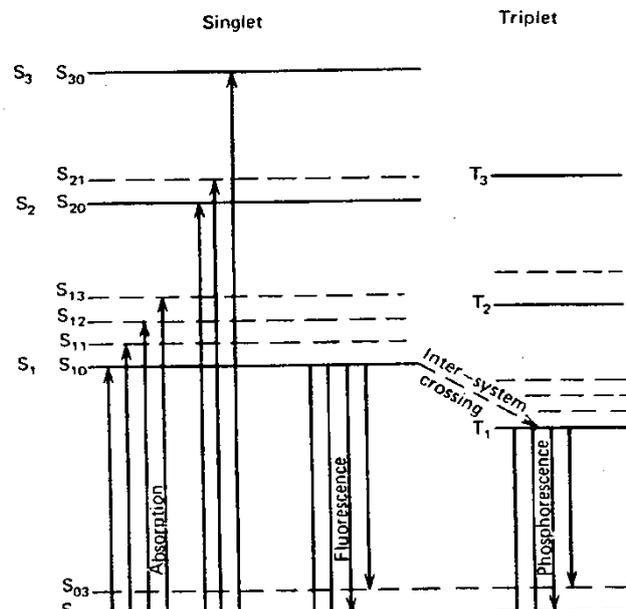
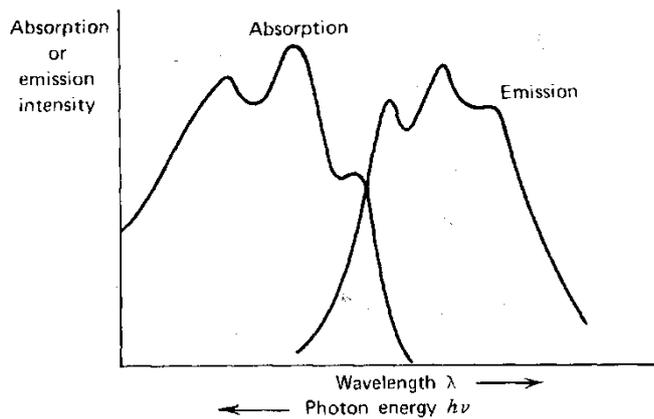


Figura 8: Struttura a π tipica dei rivelatori plastici a scintillazione



L'efficienza di uno scintillatore è definita come la frazione di energia della particella incidente che è convertita in luce visibile, purtroppo gran parte di questa energia viene anche convertita in calore.

A volte viene aggiunto un componente con funzione di "wavelength shifter", il cui compito è

Figura 9: Spettro di emissione di un rivelatore plastico

quello di assorbire la luce prodotta nella scintillazione primaria e riirradiarla con una

lunghezza d'onda maggiore, utile per ottimizzare la risposta del fotomoltiplicatore e per minimizzare gli effetti di autoassorbimento.

Infine, nella fabbricazione e nell'uso degli scintillatori organici, è importante eliminare le impurità che riducono l'emissione di luce.

6 Approccio allo studio del problema

Il presente elaborato ha lo scopo di fornire una base di dati a supporto della valutazione della segnalazione di anomalie radiometriche attribuibili alla presenza di materiale NORM.

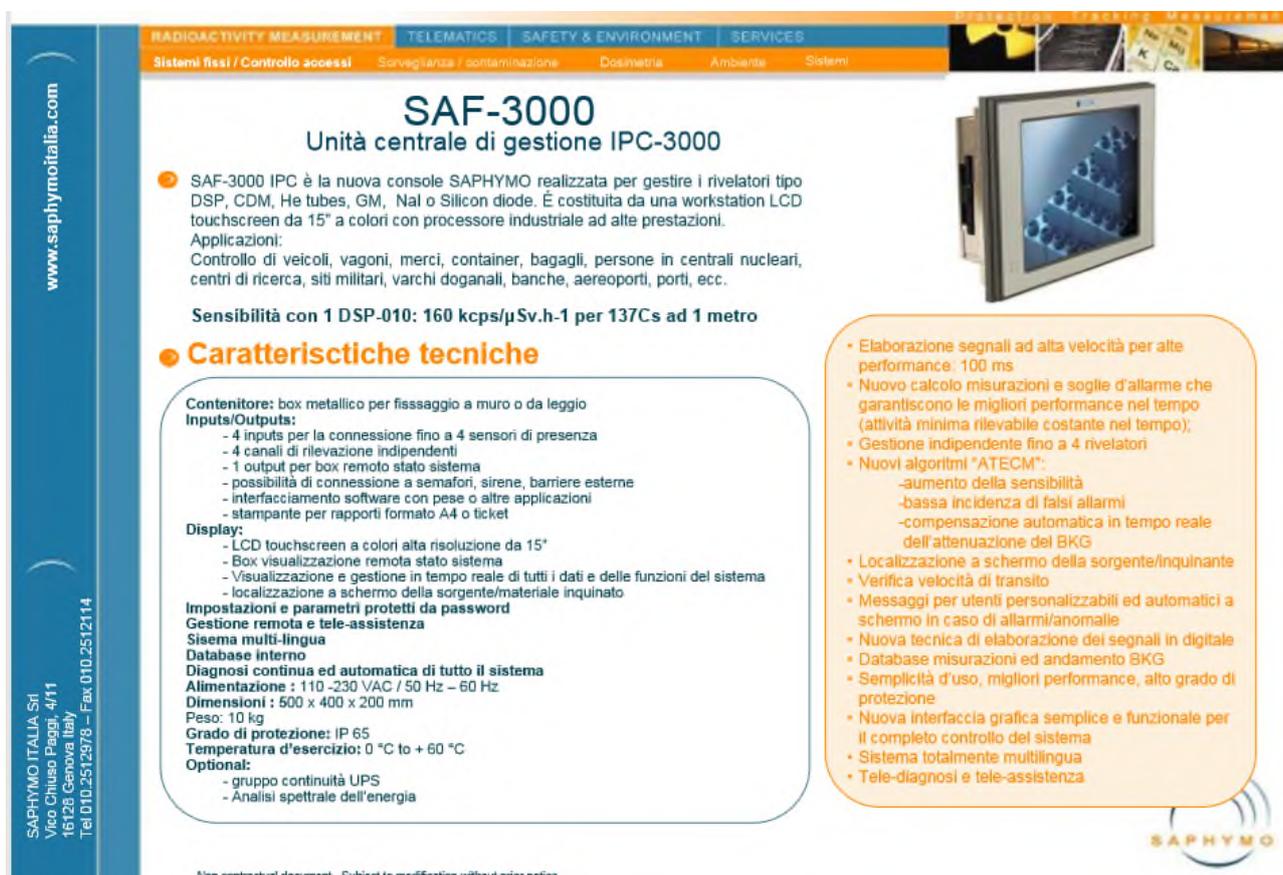
Lo studio è stato svolto utilizzando i dati forniti da un impianto di termovalorizzazione che tratta rifiuti industriali ed urbani.

Il carico di materiale da esaminare si trova su un mezzo di trasporto (autocarro, carro ferroviario o simili) che transita attraverso un portale radiometrico, il quale esegue una misura completamente automatica dei conteggi dovuti all'eventuale radioattività presente nel veicolo.

I camion, in ingresso ed in uscita dall'azienda, sono contrassegnati da documenti di trasporto (DDT) che, oltre ai dati comuni, riportano:

- codice Europeo del Rifiuto (CER);
- dimensioni;
- peso netto del carico.

Il portale presente nell'impianto di termovalorizzazione è un Saphymo-300, il cui funzionamento e scheda tecnica sono riportati di seguito.



SAF-3000
Unità centrale di gestione IPC-3000

SAF-3000 IPC è la nuova console SAPHYMO realizzata per gestire i rivelatori tipo DSP, CDM, He tubes, GM, NaI o Silicon diode. È costituita da una workstation LCD touchscreen da 15" a colori con processore industriale ad alte prestazioni.

Applicazioni:
Controllo di veicoli, vagoni, merci, container, bagagli, persone in centrali nucleari, centri di ricerca, siti militari, varchi doganali, banche, aeroporti, porti, ecc.

Sensibilità con 1 DSP-010: 160 kcps/μSv.h-1 per 137Cs ad 1 metro

Caratteristiche tecniche

Contenitore: box metallico per fissaggio a muro o da leggìo

Inputs/Outputs:

- 4 inputs per la connessione fino a 4 sensori di presenza
- 4 canali di rilevazione indipendenti
- 1 output per box remoto stato sistema
- possibilità di connessione a semafori, sirene, barriere esterne
- interfacciamento software con pese o altre applicazioni
- stampante per rapporti formato A4 o ticket

Display:

- LCD touchscreen a colori alta risoluzione da 15"
- Box visualizzazione remota stato sistema
- Visualizzazione e gestione in tempo reale di tutti i dati e delle funzioni del sistema
- localizzazione a schermo della sorgente/materiale inquinato

Impostazioni e parametri protetti da password

Gestione remota e tele-assistenza

Sistema multi-lingua

Database interno

Diagnosi continua ed automatica di tutto il sistema

Alimentazione: 110 - 230 VAC / 50 Hz - 60 Hz

Dimensioni: 500 x 400 x 200 mm

Peso: 10 kg

Grado di protezione: IP 65

Temperatura d'esercizio: 0 °C to + 60 °C

Optional:

- gruppo continuità UPS
- Analisi spettrale dell'energia

- Elaborazione segnali ad alta velocità per alte performance: 100 ms
- Nuovo calcolo misurazioni e soglie d'allarme che garantiscono le migliori performance nel tempo (attività minima rilevabile costante nel tempo);
- Gestione indipendente fino a 4 rivelatori
- Nuovi algoritmi "ATECM":
 - aumento della sensibilità
 - bassa incidenza di falsi allarmi
 - compensazione automatica in tempo reale dell'attenuazione del BKG
- Localizzazione a schermo della sorgente/inquinante
- Verifica velocità di transito
- Messaggi per utenti personalizzabili ed automatici a schermo in caso di allarmi/anomale
- Nuova tecnica di elaborazione dei segnali in digitale
- Database misurazioni ed andamento BKG
- Semplicità d'uso, migliori performance, alto grado di protezione
- Nuova interfaccia grafica semplice e funzionale per il completo controllo del sistema
- Sistema totalmente multilingua
- Tele-diagnosi e tele-assistenza

Figura 10: Scheda tecnica del portale pag. 1

RADIOACTIVITY MEASUREMENT | TELEMATICS | SAFETY & ENVIRONMENT | SERVICES

Sistemi fissi / Controllo accessi | Sorveglianza / contaminazione | Dosimetria | Ambiente | Sistemi

SAF-3000

Caratteristiche tecniche

Rivelatori:

- rivelatori a scintillazione plastica schermati: DSP-001, DSP-002, DSP-010 (volume massa sensibile da 2,5 a 25 litri)
- rivelatori CDM (Gamma/Neutroni) o AND (neutroni). La sensibilità del canale per neutroni è regolabile.

Unità centrale:

- unità workstation LCD touchscreen IPC-3000 (montaggio a muro o da leggio)
- gestione indipendente fino a 4 rivelatori
- stampa rapporti/certificati personalizzati per ogni misurazione
- utilizzo dei nuovi avanzati algoritmi ATECM
- localizzazione grafica del materiale radioattivo all'interno del carico
- allarmi sonori e visivi con ripetizione remota dello stato del sistema
- database misurazioni ed andamento BKG con capacità illimitata
- comunicazione opzionale con sistemi pesa e/o altri software
- software multi lingua e personalizzabile
- alto grado di protezione

Performance:

Il sistema SAF-3000 è stato progettato per ottenere la massima sensibilità con la più bassa incidenza possibile di falsi allarmi.

È utilizzato e testato con successo da:

- IAEA (International Atomic Energy Agency), Seibersdorf (Austria)
- CMI (Czech Metrology Institute), Praga Repubblica Ceca
- IPSN (Institute for Protection and Nuclear Safety) Francia
- JRC Ispra Center di ricerca europeo, Ispra Italia
- CEA (Atomic Energy Commission)
- French Navy
- IRSID (Research Institute for steel) Francia
- Gruppo Arcelor

Funzionamento

Il SAF-3000 può operare in modalità dinamica o statica senza alterare l'affidabilità di rilevazione, tramite i rivelatori a scintillazione plastica e/o He tubes.

Il principio di funzionamento consiste nel controllare ogni veicolo che transita nel portale, tra i rivelatori montati su ogni lato dell'area di verifica (di solito ai margini di una pesa o di un accesso).

Il sistema esegue il monitoraggio continuo della soglia ambientale (BKG) per verificare eventuali anomalie di esercizio o ambientali. All'avvicinarsi del veicolo da controllare, SAF-3000 passa automaticamente in misurazione calcolando le migliori soglie di allarme in relazione al minore numero possibile di falsi allarmi, analizzando in tempo reale, e quindi compensando, la fluttuazione del fondo ambientale per effetto della schermatura del mezzo da controllare (utilizzo algoritmi ATECM).

Al termine di ogni controllo, viene salvato nel database interno un rapporto riepilogativo di tutti i dati della misurazione (data, ora, background, valori min e max, allarmi, note personalizzabili) che può essere anche stampato come certificato.

In caso di un allarme, un segnale acustico e visivo è automaticamente generato dall'unità centrale e dal segnalatore remoto. È inoltre possibile la visualizzazione a schermo per gli utenti di messaggi personalizzabili in caso di allarmi/anomalia.

SAPHYMO ITALIA Srl
Vico Chiuse Paggi, 4/11
16128 Genova, Italy
Tel 010.2512978 – Fax 010.2512114



Non contractual document, Subject to modification without prior notice

Figura 11: Scheda tecnica del portale pag. 2

RADIOACTIVITY MEASUREMENT | TELEMATICS | SAFETY & ENVIRONMENT | SERVICES

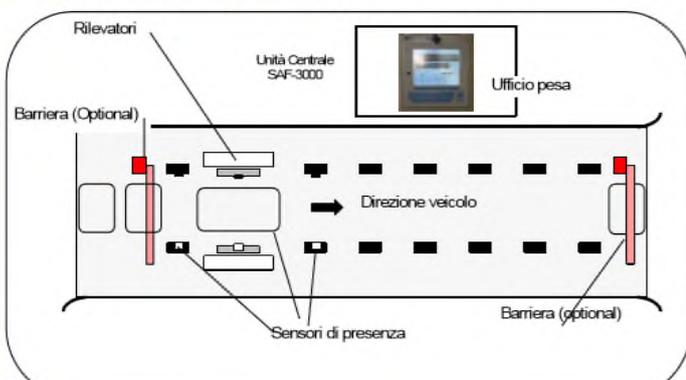
Sistemi fissi / Controllo accessi | Sorveglianza / contaminazione | Dosimetria | Ambiente | Sistemi

SAF-3000

Sistema a portale per monitoraggio camion / vagoni

Il SAF-3000 è realizzato appositamente per la rilevazione di deboli sorgenti radioattive all'interno di veicoli, vagoni o container carichi di rottami ferrosi/metallici, rifiuti, ecc. Il sistema consiste in 2 o più rivelatori a scintillazione plastica (serie DSP e/o CDM per rilevazione neutroni) connessi ad un'unità centrale di gestione IPC-3000. I portali Saphymo sono operativi in più di 900 siti per monitorare gli accessi a: centrali nucleari, centri di ricerca, acciaierie, fonderie, cantieri di rottamazione, discariche, inceneritori, ospedali, accessi doganali... È completamente automatico e progettato per operare nelle più pesanti condizioni d'esercizio.

Schema funzionamento





Caratteristiche:

- Oltre 900 utilizzatori sparsi nel mondo
- Certificato da diversi Istituti Internazionali in seguito a test su campo (ITRAP, IAEA, IRSID (Arcelor), CTHIR...)
- Nuovi algoritmi ATECM: alta sensibilità e rilevazione di deboli sorgenti radioattive
- Bassa incidenza di falsi allarmi
- Attività minima rilevabile costante nel tempo
- Completamente automatico ed autosufficiente
- Compensazione automatica ed in tempo reale dell'attenuazione del fondo naturale dovuta alla massa del veicolo da analizzare (analisi dinamica in tempo reale dei conteggi)
- Alto grado di protezione
- Gestione di più canali indipendenti di rilevazione
- Processore industriale ad alte prestazioni
- Uso semplice ed intuitivo
- Telediagnosi, teleassistenza e gestione remota

SAPHYMO ITALIA Srl
Vico Chiuse Paggi, 4/11
16128 Genova, Italy
Tel 010.2512978 – Fax 010.2512114



Non contractual document, Subject to modification without prior notice

Figura 12: Scheda tecnica del portale pag. 3

RADIOACTIVITY MEASUREMENT | TELEMATICS | SAFETY & ENVIRONMENT | SERVICES

Sistemi fissi / Controllo accessi | Sorveglianza / contaminazione | Dosimetria | Sistemi | Sistemi

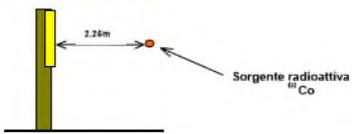
DSP-001 DSP-002 DSP-010

La serie DSP è costituita da rivelatori gamma a scintillazione plastica. I DSP, connessi all'unità centrale SAF-3000, permettono la rivelazione di deboli sorgenti e/o materiale contaminato su camion, vagoni, container, auto o persone in ingresso o uscita da centrali nucleari, centri di ricerca, discariche, acciaierie, cantieri di rottamazione, inceneritori, ecc.

Caratteristiche tecniche

Attività minima rilevabile:
Controllo statico realizzato nelle seguenti condizioni:

- Background: 70 nGy/h
- Tempo di misura $t = 1$ s
- Rate falso allarme = 0,15%
- Probabilità di rilevazione = 97,5%
- Sorgente radioattiva ^{60}Co



Permette la rilevazione di 110 kBq con il DSP-001, 75 kBq con DSP-002 e 50 kBq con DSP-010.

Controllo dinamico realizzato con un rivelatore DSP-010

- velocità di transito ≤ 10 km/h
- rilevazione di una sorgente radioattiva di ^{137}Cs di 11,1 MBq ($300 \mu\text{Ci}$) $\pm 20\%$ posta al centro di un carico di rottame avente densità di 1.200 kg/m³

Sensibilità DSP-010: 160 kcps/ $\mu\text{Sv.h-1}$ per ^{137}Cs ad 1 metro



Rivelatori a scintillazione plastica con fotomoltiplicatore di grande diametro a bassa interferenza

DSP 001: 500 x 100 x 50 mm = 2,5 litri
 DSP 002: 1000 x 100 x 50 mm = 5 litri
 DSP 010: 1000 x 500 x 50 mm = 25 litri

Sensori di presenza: infrarossi SS per uso in ambienti gravosi
 Contenitore: alluminio
 Grado di protezione: IP 65, completamente stagno

Peso:

DSP-001: 30 kg (senza schermatura in piombo)
 DSP-002: 40 kg (senza schermatura in piombo)
 DSP-010: - 300 kg (completo di schermatura in piombo)
 - 70 kg (senza schermatura in piombo)

Dimensioni:

- DSP-001: L: 91 mm x dia: 15,5 mm
 - DSP-002: L: 141 mm x dia: 15,5 mm
 - DSP-010: 1310 x 730 x 155 mm

Temperatura d'esercizio: -20 °C a +50 °C (disponibili altre versioni)

Energy range: da 50 keV a 2 MeV

SAPHYMO

Non contractual document - Subject to modification without prior notice

Figura 13: Scheda tecnica del portale pag. 4

RADIOACTIVITY MEASUREMENT | TELEMATICS | SAFETY & ENVIRONMENT | SERVICES

Sistemi fissi / Controllo accessi | Sorveglianza / contaminazione | Dosimetria | Ambiente | Sistemi

CDM

Rivelatori combinati Gamma / Neutroni

I CDM sono dei rivelatori combinati Gamma/Neutroni progettati e realizzati per la rivelazione di materiale radioattivo e nucleare. Connessi all'unità centrale SAF-3000, permettono la rilevazione di deboli sorgenti gamma e di masse di materiale fissile Plutonio, Uranio. Questi rivelatori sono stati testati ed approvati dall'IAEA.

Applicazioni:
Controllo di veicoli, vagoni, merci varie, container, bagagli, persone in centrali nucleari, centri di ricerca, siti militari, varchi doganali, banche, aeroporti, porti, ecc.

La prima serie dei rivelatori CDM è utilizzata in luoghi sensibili da oltre 15 anni.

Caratteristiche tecniche

Rivelazione: Gamma / Neutroni
Rivelatore Gamma a scintillazione plastica con fotomoltiplicatore
Misura rivelatore Gamma: 100 x 25 x 5 cm³
Rivelatore Neutroni: He-3 tubes da 1m. Il numero e la pressione dei tubi può essere regolata a seconda delle performance richieste.
Limite rivelazione Gamma a 1 m, in 1 s, con background 70 nGy/h, 5 σ : 30 kBq per il Cs-137
Contenitore: Fibra di vetro e polyester
Temperatura d'esercizio: -15°C a +50°C
Dimensioni: 2000 x 350 x 440 mm³
Peso: 170 kg (circa 374 lbs)
Grado di protezione: IP56 stagno, opzionale IP 65

Prodotto simile: Rivelatore Neutroni ADN



I test IAEA hanno provato che le performance di questo rivelatore sono migliori dei requisiti minimi ITRAP:

- Livello d'allarme per radiazioni gamma e neutroni
- Volume di rivelazione
- Probabilità di rivelazione
- Disponibilità operativa
- Indice di falsi allarmi

SAPHYMO

Non contractual document - Subject to modification without prior notice

Figura 14: Scheda tecnica del portale pag. 5

Il rateometro utilizzato nell'impianto di termovalorizzazione è un Ludlum 2214/44-11, la cui scheda tecnica è riportata di seguito.

Model 44-11 Gamma Detector

| | |
|--|--|
| Indicated Use | High sensitivity gamma measurements, Gamma survey |
| Detector Type | Nal(Tl) scintillator, 5.1 cm (2 in) dia. x 5.1 cm (2 in) thick |
| Sensitivity (¹³⁷ Cs gamma) | 900 cpm per μ R/hr |
| Energy Response | Energy dependent |
| Background | 9750 cpm |
| Photomultiplier Tube | 5.1 cm (2 in) diameter, magnetically shielded |
| Operating Voltage | 500 to 1200 V (typical) |
| Connector | Series "C" |
| Construction | Integral-line |
| Housing Construction | 0.05 cm (0.02 in.) thick aluminum |
| Size (D x L) | 6.4 x 26.7 cm (2.5 x 10.5 in) |
| Weight | 0.6 kg (1.4 lb) |



Figura 15: Scheda tecnica rateometro

Le procedure, applicate dall'impianto per il controllo dei carichi, vengono illustrate di seguito.

1. Misure effettuate tramite strumentazione fissa:

- visto che il valore della radiazione del fondo ambientale viene influenzato dalla presenza dei veicoli in prossimità dei rivelatori è opportuno che non sostino mezzi di trasporto nei pressi del portale; durante il passaggio di un veicolo, quindi, il successivo deve sostare ad una distanza non inferiore a 5 m;
- il transito attraverso il portale deve avvenire a velocità ridotta (non superiore a 8 km/h);
- in caso di allarme la misura deve essere ripetuta facendo transitare il veicolo nel senso opposto di marcia e più lentamente, con velocità di circa 2 km/h, per altre 3 volte in modo da ottenere ulteriori dati da analizzare.

I canali del portale sono i rivelatori posti rispettivamente a sinistra e a destra del carico transitante e per ognuno di essi il portale fornisce:

- Background: conteggi registrati attribuibili alla radiazione di fondo;
- Background di riferimento: viene abbattuto il valore della radiazione di fondo attraverso un algoritmo proprio del portale in modo da isolare i conteggi dovuti solamente al passaggio del carico;

Stesse considerazioni valgono qualora almeno uno dei due valori risulti superiore a quello del fondo di prova.

2.3 Stima della soglia di attenzione: viene calcolato un valore di dose che serve a discriminare la presenza di un eventuale anomalia radiometrica all'interno del carico; solitamente la soglia di attenzione ha un valore pari al doppio del "fondo di riferimento a 30 cm dal carico".

2.4 Effettuazione delle rivelazioni: le misure possono essere effettuate con tecnica puntuale eseguendo una magliatura delle superfici del contenitore di trasporto di lato non superiore a 100 cm. I valori vengono rilevati a 30 cm dalla superficie del vano in corrispondenza del centro di ogni quadrato della maglia. Ogni valore che superi del 50% quello del "fondo di riferimento a 30 cm" deve essere ritenuto indicativo di una anomalia radiometrica.

Può anche essere utilizzata una scansione continua spostando mutualmente il rivelatore e la superficie del carico e verificando il rateo istantaneo di misura. La velocità di spostamento non deve superare 0,3 m/s.

Località/Impianto/società: _____

Esecutore dei rilievi: _____

Responsabile dell'impianto: _____

Strumento utilizzato: _____

Targa automezzo: Autocarro Semirimorchio Rimorchio

Identificazione carico: **PRODUTTORE:** _____ **CER:** _____
 (formulario, DOT, peso netto **FORMULARIO:** _____
 descrizione rifiuto ...) **CONF. N°** _____

Parte a) - Rilievo del fondo naturale di radiazione in assenza di carico (FN)
 (media di 10 rilevazioni istantanee intervallate da 10 s eseguite a 1 m dal suolo, in assenza del carico)

| Misura 1 (µSv/h) | Misura 2 (µSv/h) | Misura 3 (µSv/h) | Misura 4 (µSv/h) | Misura 5 (µSv/h) | Misura 6 (µSv/h) | Misura 7 (µSv/h) | Misura 8 (µSv/h) | Misura 9 (µSv/h) | Misura 10 (µSv/h) | Media (FN) (µSv/h) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| 0,041 | 0,053 | 0,052 | 0,053 | 0,047 | 0,049 | 0,051 | 0,053 | 0,046 | 0,048 | 0,049 |

Note: _____

Parte b) - Rilievo del fondo di riferimento a distanza non maggiore di 20 cm dalle pareti del carico

Posizioni di misura
 Dimensioni in m

FC1 = 0,053 (µSv/h)
 (attendere almeno 8 secondi prima di rilevare la misura)

FC2 = 0,065 (µSv/h)
 (attendere almeno 8 secondi prima di rilevare la misura)

TEST 1: FC1 e FC2 ≤ FN ? SI NO
 (Se NO interrompere misure e dare comunicazione immediata a Responsabile dell'impianto/EQ)

$\Delta FC = FC_{max} - FC_{min} = 0,012$ (µSv/h)
 (differenza tra il maggiore ed il minore tra FC1 e FC2)

50%FC_{min} = 0,0265 (µSv/h)
 (dividere per 2 il minore tra FC1 e FC2)

TEST 2: $\Delta FC \leq 50\%FC_{min}$? SI NO
 (Se NO interrompere misure e dare comunicazione immediata a Responsabile dell'impianto/EQ)

$FC_{ref} = (FC1 + FC2) / 2 = 0,059$ (µSv/h)

Soglia di Attenzione (SA) = 2,0 X FC_{ref} = 0,118 (µSv/h)

Figura 17: Scheda tecnica operatore pag.1

Parte c) Rilievi sul carico per localizzazione punti di irradiazione

Effettuare le misurazioni con il metodo in scansione continua, avendo cura di:

- mantenere la sonda in prossimità della superficie del carico (a non più di 20 cm dalle superficie)
- verificare costantemente il rateo istantaneo di misura visualizzato sul display dello strumento
- spostarsi molto lentamente (velocità di traslazione $\leq 0,3$ m/s)
- coprire tutta l'area di misura (tutte le parti accessibili) secondo fasce di larghezza non maggiore di 50 cm.

Ogni lettura strumentale che superi la Soglia di Attenzione (cfr. pag. precedente), o che sia superiore al valore del fondo ambientale (FN) deve essere ritenuta indicativa di una "anomalia radiometrica" del carico ed opportunamente annotata nel seguito.

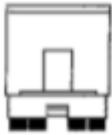
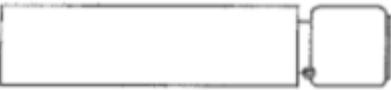
| | |
|---|---|
|  | Lato destro - Note HIS MAX 0,307 |
|  | Lato sinistro - Note HIS MAX 0,036 |
|  | Lato posteriore - Note HIS MAX 0,057 |
|  | Lato anteriore - Note HIS MAX 0,059 |
|  | Lato superiore - Note / |
|  | Lato inferiore - Note / |
|  | Cabina di guida - Note 0,040 |

Figura 18: Scheda tecnica operatore pag. 2

Bisogna sottolineare che sia i conteggi del portale che la dose registrata dall'operatore mediante rateometro sono stime qualitative e non danno alcuna informazione relativa all'attività del materiale che può aver causato l'anomalia radiometrica.

Come detto in precedenza, nel caso in cui il portale rilevi un'anomalia radiometrica, è responsabilità dell'azienda decidere se fermare o lasciar proseguire il carico con tutti i rischi che ne possono derivare.

Parte c) Rilievi sul carico per localizzazione punti di irradiazione

Effettuare le misurazioni con il metodo in scansione continua, avendo cura di:

- mantenere la sonda in prossimità della superficie del carico (a non più di 20 cm dalle superficie)
- verificare costantemente il rateo istantaneo di misura visualizzato sul display dello strumento
- spostarsi molto lentamente (velocità di traslazione $\leq 0,3$ m/s)
- coprire tutta l'area di misura (tutte le parti accessibili) secondo fasce di larghezza non maggiore di 50 cm.

Ogni valore rilevato che superi la Soglia di Attenzione (cfr. pag. precedente) deve essere ritenuta indicativa di una "anomalia radiometrica" del carico ed opportunamente annotata nel seguito; nel caso non si rilevino dati superiori alla Soglia di attenzione registrare nel campo note la dicitura "S.A."

| | |
|---|--|
|  | Lato destro - Note 115 MAY 0,152 <S.A. |
|  | Lato sinistro - Note 115 MAY 0,304 <S.A. |
|  | Lato posteriore - Note 115 MAY 0,17 <S.A. |
|  | Lato anteriore - Note 115 MAY 0,037 <S.A. |
|  | Lato superiore - Note |
|  | Lato inferiore - Note |
|  | Cabina di guida - Note 0,036 <S.A. |

Figura 20: Risultati analisi dell'operatore tramite rateometro

Per le tipologie 1 e 3 il carico non viene fermato e prosegue nella sua lavorazione.

Per la tipologia 2 il picco indica la presenza di una anomalia responsabile dell'allarme e localizzata nel carico, ipotesi spesso confermata dall'analisi dell'operatore tramite rateometro, capace di localizzare il punto da cui l'anomalia proviene, come mostrato in figura 14. La natura dell'anomalia è ignota e quindi si procede al fermo del carico, anche se non è raro, specialmente per i carichi contenenti rifiuti solidi urbani, che essa sia dovuta alla presenza di oggetti provenienti da trattamenti medicali, il caso più frequente è lo Iodio. Avendo lo Iodio 131 un tempo di dimezzamento di 8 giorni, per questa tipologia, solitamente il carico viene fermato per lo stesso intervallo di tempo al termine del quale viene ripetuta la misura. Nel caso in cui l'anomalia radiometrica fosse effettivamente dovuta allo Iodio 131 il valore di conteggi registrati dal portale saranno ridotti e probabilmente inferiori al

valore della soglia di conseguenza, non essendo necessaria un'attività di bonifica del carico, si riducono notevolmente i tempi di attesa ed i costi.

La tipologia 4 è la più incerta soprattutto se i valori registrati dall'operatore sono al di sotto della *soglia di attenzione* e quindi non si è in grado di localizzare l'origine dell'anomalia radiometrica; è su questa tipologia che ho prevalentemente focalizzato lo studio.

Per ottenere una base di dati da fornire come supporto circa il destino dei carichi in ingresso, si è dapprima effettuata una selezione degli eventi significativi, avvenuti nell'arco di due anni, nell'impianto di termovalorizzazione.

Essendo le ceneri *leggere e pesanti*³, ottenute dall'incenerimento dei carichi in ingresso, destinate a lavorazioni successive presso altri impianti, i carichi in uscita vengono fatti passare attraverso il portale radiometrico e la loro composizione viene studiata ad intervalli regolari⁴.

In seguito, non essendo presente per la maggior parte dei carichi in ingresso un'analisi di laboratorio, si è cercata una correlazione tra i conteggi forniti dal portale e la dose causata dai carichi in uscita, di composizione nota, attraverso l'uso del software "Microshield". Successivamente, accertatisi della validità dei risultati trovati, si è cercata in modo analogo, una correlazione per i carichi in ingresso e si sono ricavati i valori accettabili secondo la direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio, del 5 dicembre 2013.

³ Le ceneri leggere o volanti derivano dai trattamenti di depurazione dei reflui gassosi e ceneri di caldaia e sono costituite dai sali di metalli condensati sulle pareti della caldaia di recupero energia. Sono prodotte in quantità variabili tra 30 e 60 kg per tonnellata di rifiuto; sono rifiuti pericolosi e vengono generalmente smaltite in discarica.

Le ceneri pesanti, invece, sono costituite dal residuo non combustibile dei rifiuti, dei residui metallici e non metallici e da materiale organico incombusto, comprese le ceneri di griglia che transitano attraverso le parti mobili e le aperture della stessa (per gli inceneritori dotati di impianto a griglia); rappresentano la frazione più rilevante degli scarti prodotti dal processo di incenerimento (da 200 a 300 kg per ogni tonnellata di rifiuto, in funzione della composizione di quest'ultimo). Sono rifiuti non pericolosi e su di loro si concentra l'attenzione per sviluppare tecnologie di recupero alternative allo smaltimento in discarica.

⁴ L'impianto di termovalorizzazione esegue delle analisi di laboratorio periodiche delle ceneri leggere e pesanti, visto che la procedura di incenerimento incrementa la concentrazione di isotopi radioattivi rispetto a quella eventualmente presente nei carichi in ingresso.

7 MicroShield

7.1 Descrizione e dettagli tecnici

MicroShield è un software realizzato dalla Grove Software ad oggi presente nella versione 11.22. Si tratta di un' applicazione completa per la schermatura di fotoni/raggi gamma e la stima di dose; ampiamente utilizzato per progettare schermi, stimare la forza di una sorgente partendo dalle misurazioni di radiazioni, minimizzare l'esposizione della popolazione ed istruire sui principi di schermatura. E' una applicazione utile per fisici della salute, gestori dei rifiuti, ingegneri di progetto ed ingegneri radiologici, il cui utilizzo richiede solo una conoscenza di base dei principi di radiazione e schermatura.

Microshield è completamente interattivo ed ha un ampio controllo degli errori di input. Strumenti integrati forniscono grafici dei risultati, permettono la creazione di materiale e file di sorgenti, calcoli DTC (metodo di conversione che consente di stimare il repertorio di radioisotopi di un fusto attraverso un' analisi non distruttiva), proiezione del tasso di esposizione in funzione del tempo di decadimento ed accesso a dati di materiali e nuclidi.

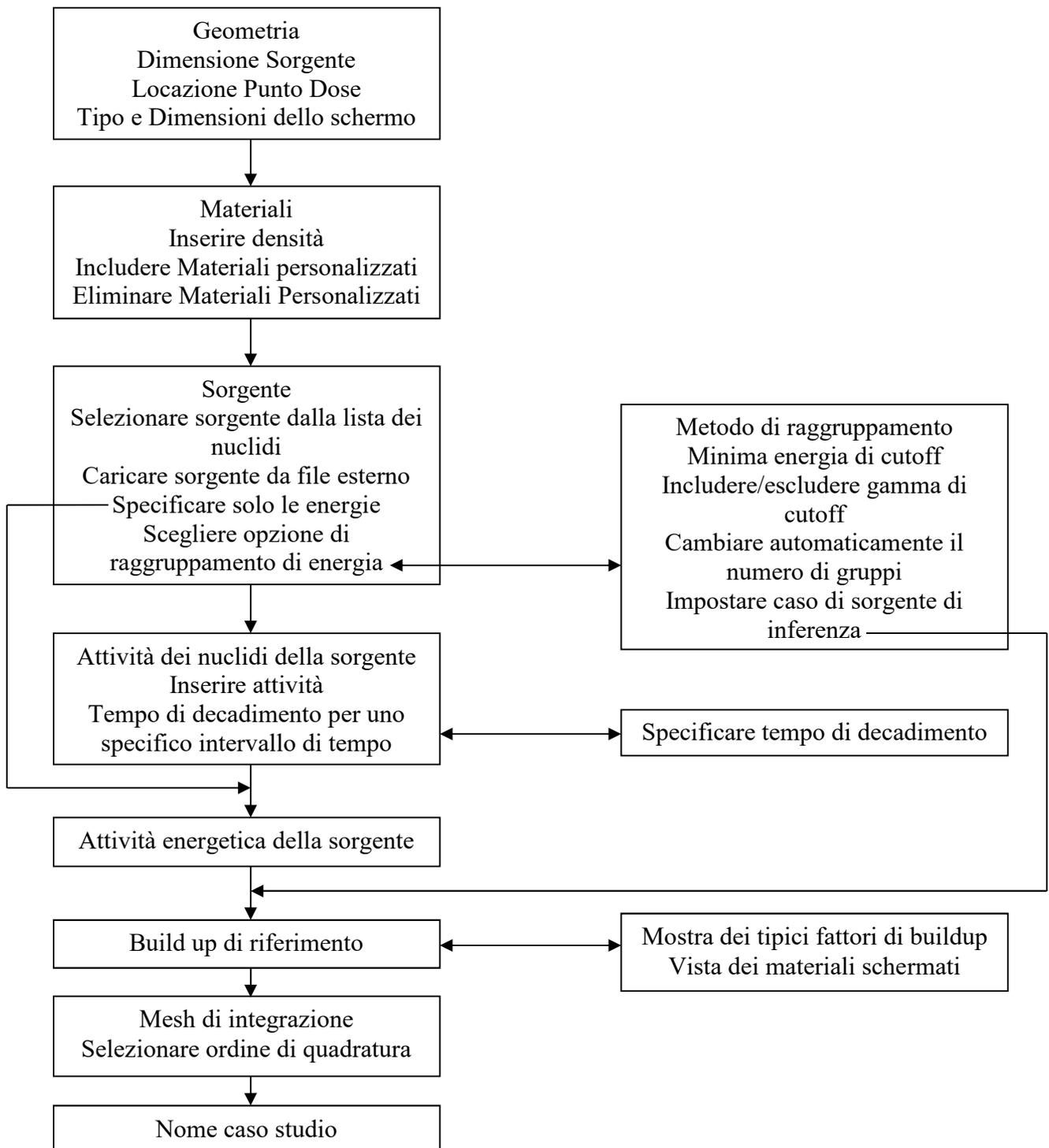
Le caratteristiche di MicroShield 4.2 includono:

- compatibilità completa con Microsoft Windows Vista;
- possibilità di esportare i risultati in Microsoft Word ed Excel;
- applicazione del software in lingua inglese, utilizzando formati numerici internazionali (virgole, decimali, etc...);
- sedici geometrie che consentono la disposizione di punto dose, scudo auto-schermante, rivestimento del cilindro e l'aggiunta di un massimo di dieci schermi;
- la visualizzazione della geometria che viene automaticamente aggiornata man mano che le dimensioni vengono immesse;
- vasta libreria contenente quasi 500 diversi radionuclidi;
- calcolo simultaneo di risultati cumulativi e non collimati;
- possibilità di progettare e salvare fino a otto materiali personalizzati da aggiungere ai dodici già presenti;
- possibilità di creare, salvare e spostare le sorgenti tra i vari casi, sia come nuclidi o energie, sia come concentrazioni o totali. Sono disponibili diversi metodi di raggruppamento dei fotoni, compresi quelli personalizzati;
- calcolo del decadimento della fonte attraverso i prodotti figli generati;

- l' utilizzo di massimo venticinque gruppi di energia di intervallo compreso tra 15 keV e 10 MeV; l'input può essere espresso sia come concentrazione sia come totale;
- opportunità di esaminare la dimensione della sorgente, lo spessore dello schermo, la distanza e la sensibilità del tasso di esposizione in base al tempo;
- il calcolo del calore ed energia di decadimento.

7.2 Step di processo

Gli step di processo del software vengono illustrati nel seguente diagramma di flusso:



La schermata iniziale del software permette di eseguire diverse operazioni, in particolare:

- **New case:**
consente la creazione di un nuovo caso-studio da analizzare.

- **Modify the case input:**
consente di modificare un caso-studio già creato, eccetto la geometria del sistema in esame. Questa restrizione è necessaria per verificare la consistenza e la completezza dei dati di input con la geometria.

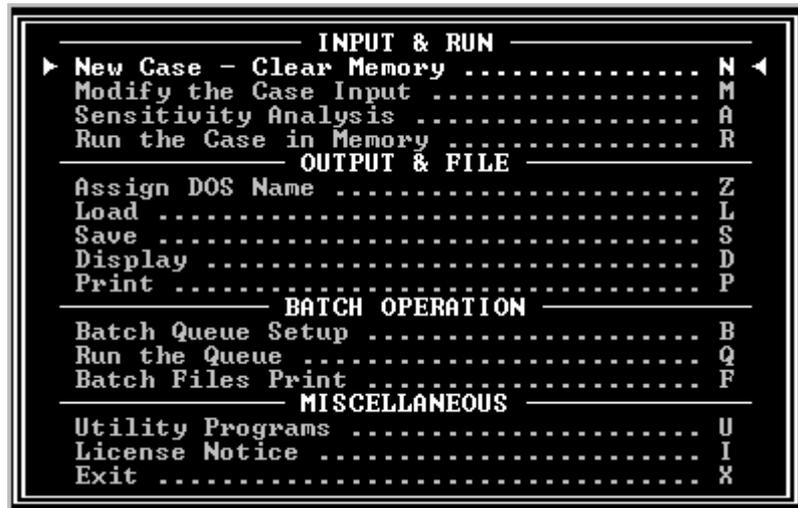


Figura 21: Pannello principale

- **Sensitivity analysis:**
lo studio di sensitività consiste nell'esecuzione di diversi calcoli variando un parametro per verificarne gli effetti. Questa funzione è utile, ad esempio, per lo studio della dipendenza dell'esposizione alle radiazioni in base allo spessore di uno schermo.
- **Batch queque setup:**
consiste nella selezione di diversi casi studio da valutare in successione, operazione molto utile per eseguire valutazioni di casi-studio che richiedano un elevato tempo computazionale.
- **Run the queue:**
inizia il calcolo dei diversi casi-studio selezionati precedentemente.

7.3 Creazione di un caso-studio

Nel seguito verrà illustrata la procedura da eseguire per la creazione di un caso-studio su MicroShield 4.2:

1 Selezione geometria:

| <u>Source Configuration</u> | <u>Possible Shields</u> |
|--|--------------------------------------|
| Point | Slabs |
| Line | Slabs, Immersion |
| Disk | Slabs |
| Rectangular Area - Vertical | Slabs |
| Rectangular Area - Horizontal | Slabs, Immersion |
| Sphere | Spherical, Transition, Slabs |
| Cylinder Volume - Side Shields | Cylindrical, Clad, Transition, Slabs |
| Cylinder Volume - End Shields | Slab, Immersion |
| Cylinder Surface - Internal Dose Point | Immersion |
| Cylinder Surface - External Dose Point | Cylindrical, Clad, Transition, Slabs |
| Annular Cylinder - Internal Dose Point | Core, Cylinder |
| Annular Cylinder - External Dose Point | Core, Cylindrical, Transition, Slabs |
| Rectangular Volume | Slab, Immersion |
| Truncated Cone | Slab |
| Infinite Plane | Slab |
| Infinite Slab | Slab |

Figura 22: Possibili configurazioni geometriche e rispettivi schermi utilizzabili

Per ogni configurazione si forniscono le dimensioni geometriche e la posizione del “punto dose” (punto in cui verranno effettuate le valutazioni).

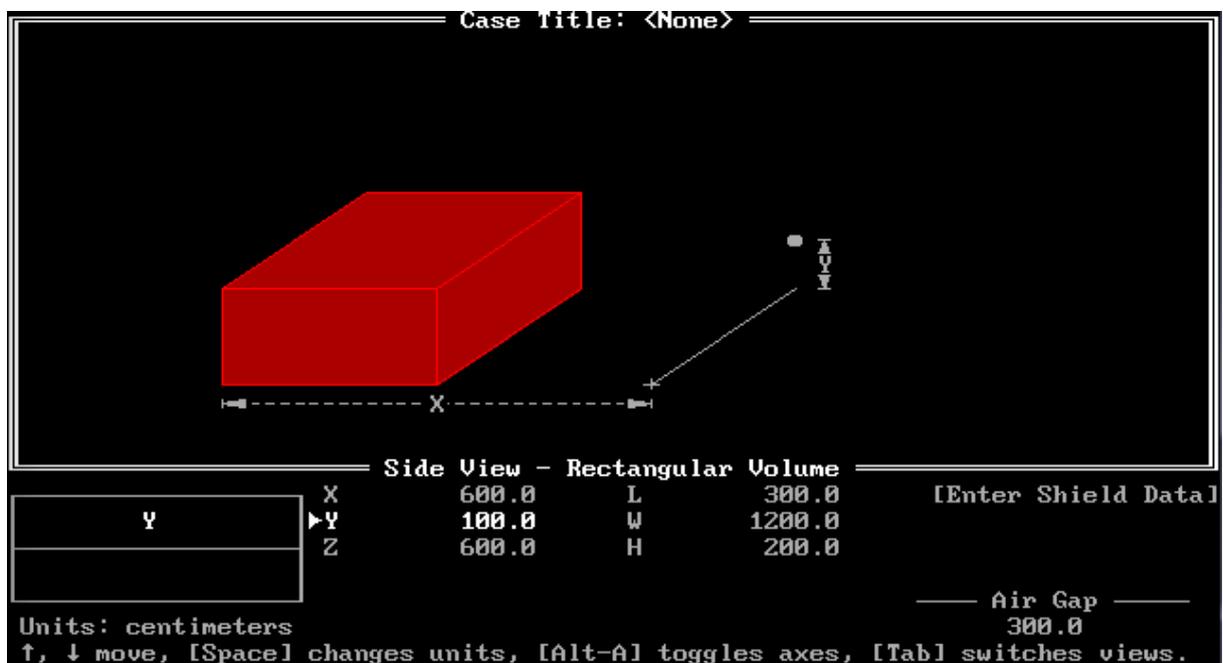


Figura 23: Esempio di configurazione “Rectangular volume”, vista frontale

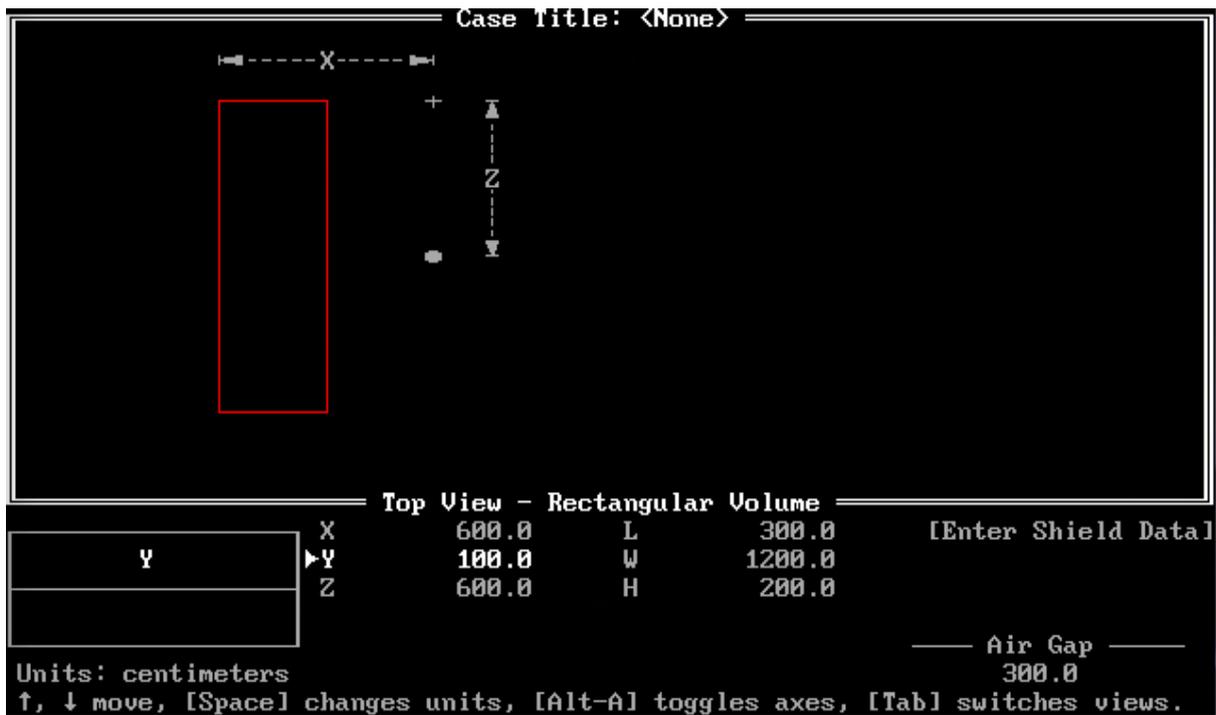


Figura 24: Esempio di configurazione "Rectangular volume", vista in pianta

Possono essere implementati un massimo di 10 schermi in serie di spessore personalizzabile. La distanza rimanente tra il punto dose e gli schermi selezionati viene automaticamente considerata aria.

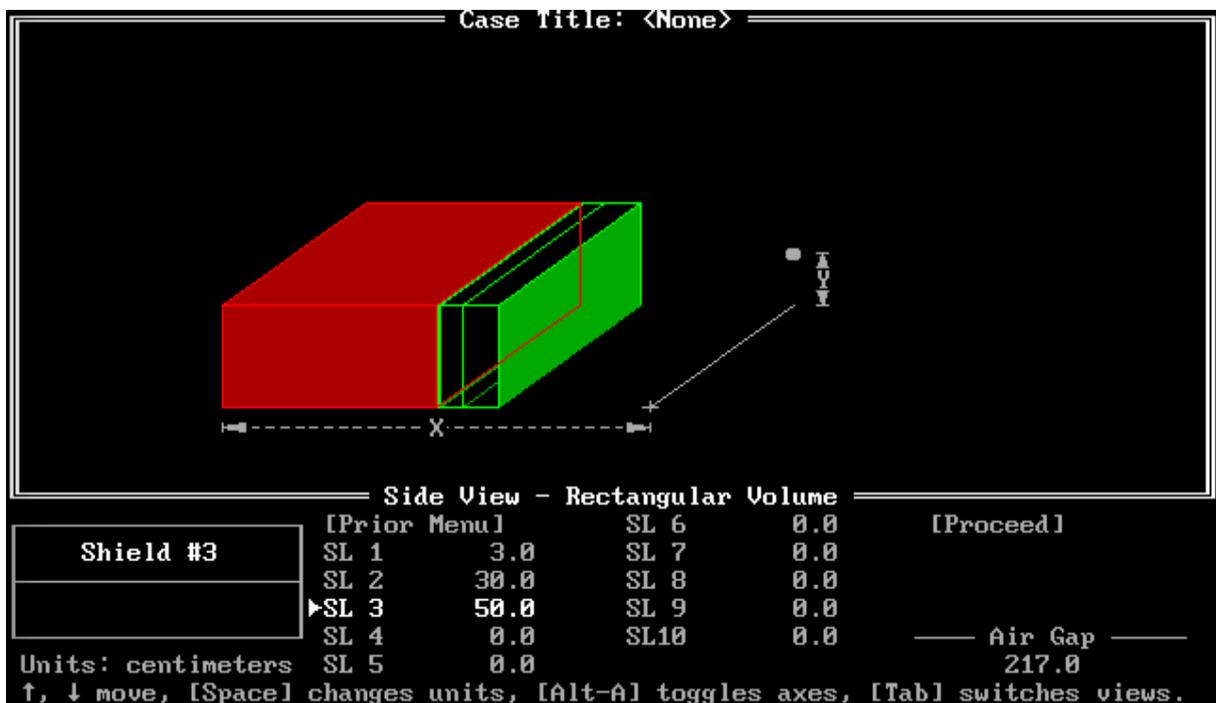


Figura 25: Esempio di configurazione "Rectangular volume" con aggiunta di 3 schermi, vista frontale

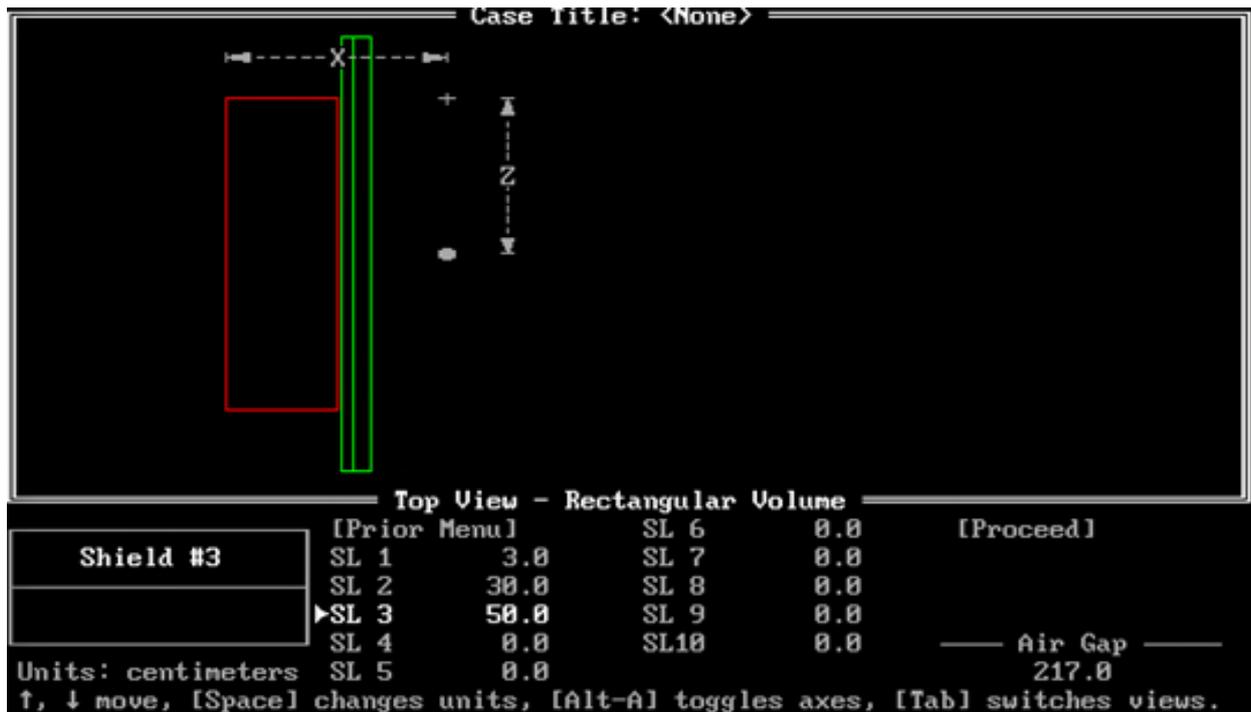


Figura 26: Esempio di configurazione "Rectangular volume" con aggiunta di 3 schermi, vista in pianta

2 Selezione dei materiali costituenti il caso-studio:

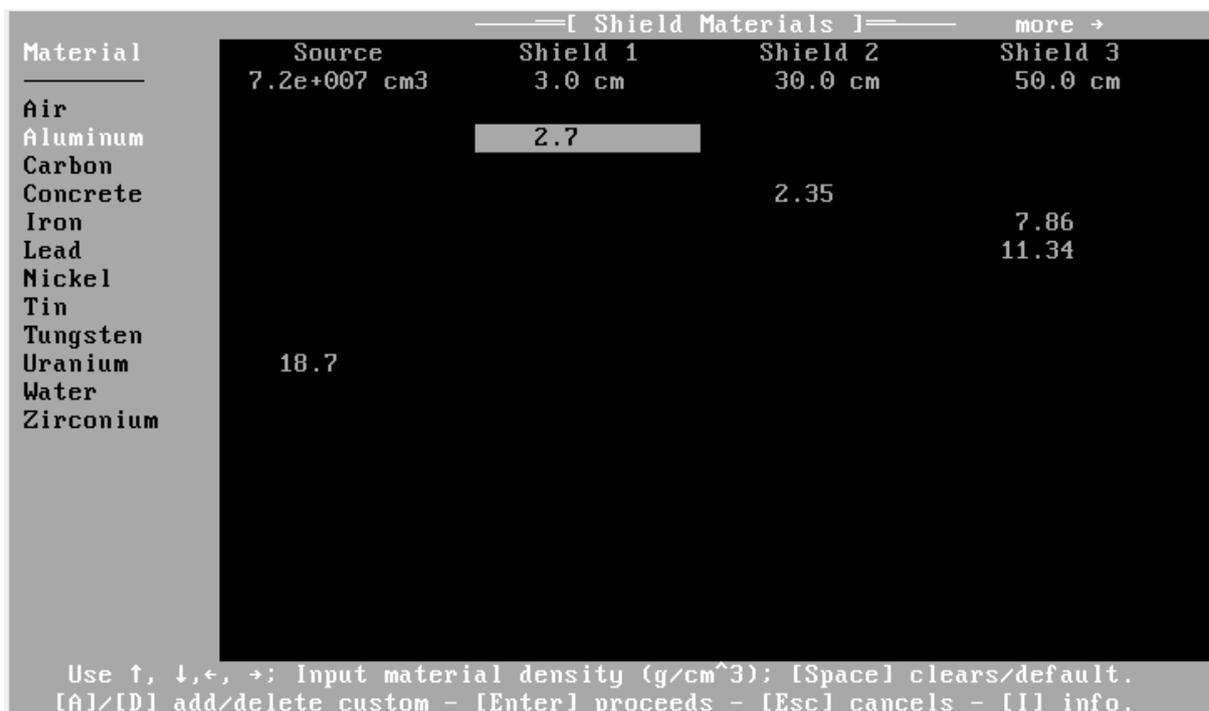


Figura 27: Schermata di scelta dei materiali

3 Creazione sorgente:

SOURCE INPUT

1. Change the photon energy grouping specifications ... F1
- ▶ 2. New from the library of nuclides F2 ◀
3. New user specified activity and energies F3
4. New user specified activity at standard energies ... F4
5. External source file (*.MSS) F5
6. Source Inference Correlation F6

↑, ↓ & [Enter], Number or [F] key. [Esc] cancels.

STATUS OF PHOTON ENERGY SORTING/GROUPING OPTIONS

Energy grouping method: Standard Indices
 Automatic # of groups: 25
 Lower energy cutoff: .015 MeV
 Photons below .015 MeV: EXCLUDED

Grouping options are designed for photon sorting. Be aware that direct entry of energies (standard or specific values) may change the option.

Figura 28: Scelta e definizione della sorgente

[SELECT NUCLIDE]

Use first letter or arrow keys, [PgUp], [PgDn], [Home], [End] for locating.
 Use [Space] to select; Press [Enter] to Proceed; [Esc] to cancels.

Cursor on: Carbon - index: 65

| | | | | | | | |
|---------------|--------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| Ac-225 | Ac-227 | Ac-228 | Ag-106m | Ag-108 | Ag-108m | Ag-109m | Ag-110 |
| Ag-110m | Ag-111 | Al-26 | Al-28 | Am-241 | Am-242 | Am-242m | Am-243 |
| Am-244 | Am-245 | Am-246 | Ar-37 | Ar-39 | Ar-41 | As-72 | As-73 |
| As-74 | As-76 | As-77 | At-211 | At-217 | Au-194 | Au-195 | Au-195m |
| Au-196 | Au-198 | Au-199 | Ba-131 | Ba-133 | Ba-133m | Ba-135m | Ba-137m |
| Ba-139 | Ba-140 | Ba-141 | Ba-142 | Be-7 | Be-10 | Bi-206 | Bi-207 |
| Bi-208 | Bi-210 | Bi-211 | Bi-212 | Bi-213 | Bi-214 | Bk-249 | Bk-250 |
| Bk-251 | Br-77 | Br-80 | Br-80m | Br-82 | Br-83 | Br-84 | Br-85 |
| C-11 | C-14 | C-15 | Ca-41 | Ca-45 | Ca-47 | Ca-49 | Cd-109 |
| Cd-111m | Cd-113 | Cd-113m | Cd-115 | Cd-115m | Cd-117 | Cd-117m | Ce-139 |
| Ce-141 | Ce-143 | Ce-144 | Cf-248 | Cf-249 | Cf-250 | Cf-251 | Cf-252 |
| Cf-253 | Cf-254 | Cl-36 | Cl-38 | Cm-242 | Cm-243 | Cm-244 | Cm-245 |
| Cm-246 | Cm-247 | Cm-248 | Cm-249 | Cm-250 | Co-56 | Co-57 | Co-58 |
| Co-58m | Co-60 | Co-60m | Co-61 | Cr-49 | Cr-51 | Cs-126 | Cs-129 |
| Cs-131 | Cs-132 | Cs-134 | Cs-134m | Cs-135 | Cs-136 | Cs-137 | Cs-138 |
| Cs-139 | Cu-61 | Cu-62 | Cu-64 | Cu-67 | Dy-157 | Dy-165 | Dy-166 |
| Er-169 | Er-171 | Es-253 | Es-254 | Es-254m | Es-255 | Eu-152 | Eu-152m |
| Eu-154 | Eu-155 | Eu-156 | F-18 | Fe-52 | Fe-55 | Fe-59 | Fm-254 |
| Fm-255 | Fm-256 | Fr-221 | Fr-223 | Ga-66 | Ga-67 | Ga-68 | Ga-72 |
| Gd-152 | Gd-153 | Gd-159 | Gd-162 | Ge-68 | Ge-71 | Ge-77 | H-3 |

Figura 29: Esempio di nuclidi disponibili nel database

```

===== [ ENTER SOURCE ACTIVITIES ] =====
Press [N] to add nuclides; [T] to enter decay time.
Grouping method is Standard Indices *** Decay time is zero.
Nuclide      curies      becquerels       $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$        $\text{Bq}/\text{cm}^3$ 
Ac-228      1.0000e+000      3.7000e+010      1.3889e-002      5.1389e+002
Be-10      5.4054e-011      2.0000e+000      7.5075e-013      2.7778e-008
Co-60      2.1600e+002      7.9920e+012      3.0000e+000      1.1100e+005
Cs-131      7.7838e-003      2.8800e+008      1.0811e-004      4.0000e+000

Use ↑, ↓, ←, →: Enter values; [Enter] proceeds; [Esc] cancels. Units convert.

```

Figura 30: Selezione attività dei nuclidi della sorgente

```

===== [ ENTER AND/OR VERIFY SOURCE ACTIVITY ] =====
Scroll to an entry location and enter a value. Activity units will convert.
Press [Enter] to proceed. [Esc] cancels.
Group #      Energy (MeV)      Activity Photons/sec      Rect. solid Source Photons/sec/cm^3      % Energy wtd Activity
1          0.015          [ ]
2          0.02
3          0.03          2.1351e+008          2.9654e+000          3.20e-05
4          0.04
5          0.05
6          0.06          1.8551e+008          2.5765e+000          5.56e-05
7          0.08          7.8906e+008          1.0959e+001          3.15e-04
8          0.1          2.3675e+009          3.2882e+001          .001
9          0.15          1.4513e+009          2.0156e+001          .001
10         0.2          1.9463e+009          2.7032e+001          .002
11         0.3          7.2122e+009          1.0017e+002          .011
12         0.4          8.4042e+008          1.1672e+001          .002
13         0.5          2.0959e+009          2.9110e+001          .005
14         0.6          1.8704e+009          2.5978e+001          .006
15         0.8          4.4942e+009          6.2419e+001          .018
16         1.0          8.0130e+012          1.1129e+005          40.033
17         1.5          7.9957e+012          1.1105e+005          59.920
18         2.0          3.8946e+007          5.4092e-001          3.89e-04
19         3.0

```

Figura 31: Verifica dell'attività della sorgente

| SELECT A SHIELD FOR BUILDUP FACTOR REFERENCE MATERIAL | | | |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Name of Shield | Input Thickness (or source size) | Total Density (gm/cm ³) | Typical MFP* at 0.03 MeV |
| Source | 7.2e+007 cm ³ | 18.7 | 1.1e+05 |
| Shield 1 | 3.0 cm | 2.7 | 8.465 |
| Shield 2 | 30.0 cm | 2.35 | 80.511 |
| ▶Shield 3 | 50.0 cm | 19.2 | 2.0e+04 ◀ |
| Air Gap | 217.0 cm | 0.00122 | .086 |

↑, ↓ selects. [Esc] cancels.

Temporarily assigned reference material: Shield 3
 * Typical means on a line between the dose point and source center.
 Press: [I] Instruction; [E] Energy for MFPs; [M] Materials; [B] Buildup

Figura 32: Selezione di materiale per cui considerare il build up

4 Identificazione mesh di calcolo:

—————[INTEGRATION PARAMETERS]—————

Geometry: Rectangular Volume

Enter or accept a quadrature order 10 or greater for each parameter shown. Higher values will generally yield better results at the cost of more run time.

| X Direction | Y Direction | Z Direction |
|-------------|-------------|-------------|
| 10 | 20 | 20 |

If you're unsure as to the best choice, run cases with values at 16, 20, and higher until results approach convergence.

Use ←, → to select. Enter even integer values (minimum = 8).
 [Space] selects original. Press [Enter] to proceed. [Esc] cancels.

Figura 33: Schermata di selezione della mesh di calcolo

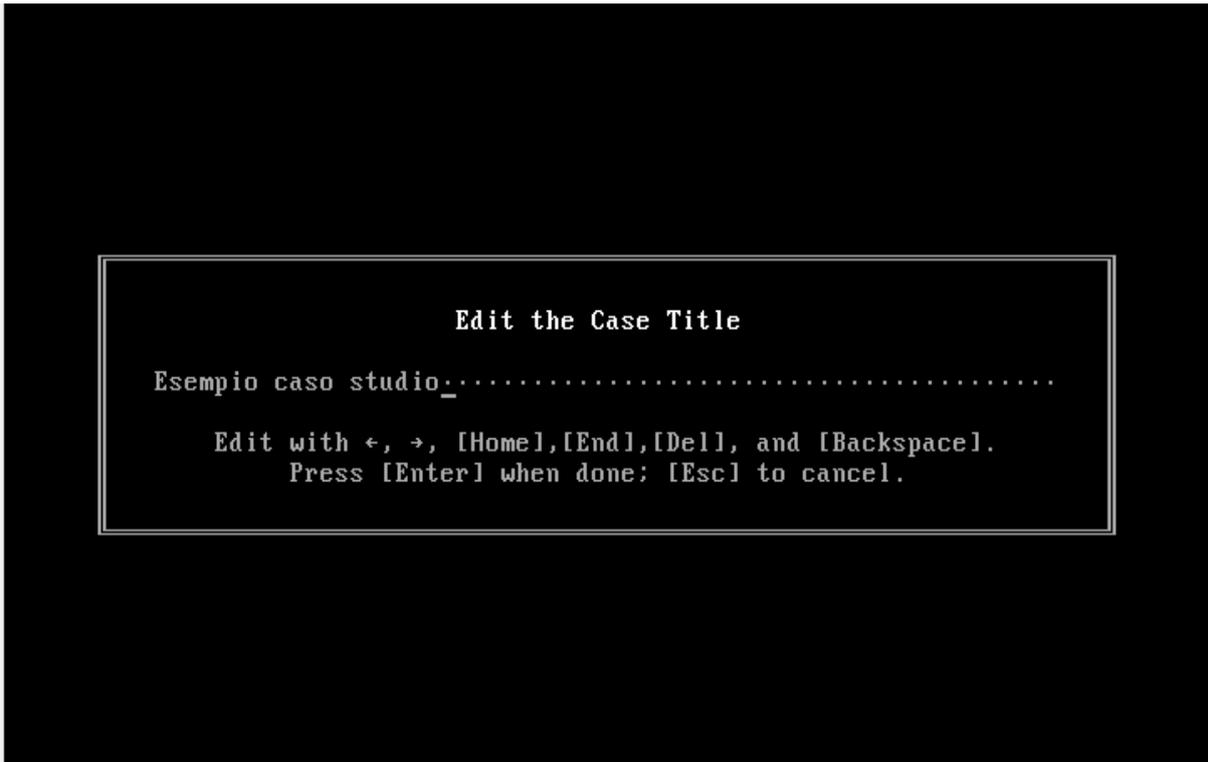


Figura 34: Inserimento nome del caso studio

5 Risultati analisi

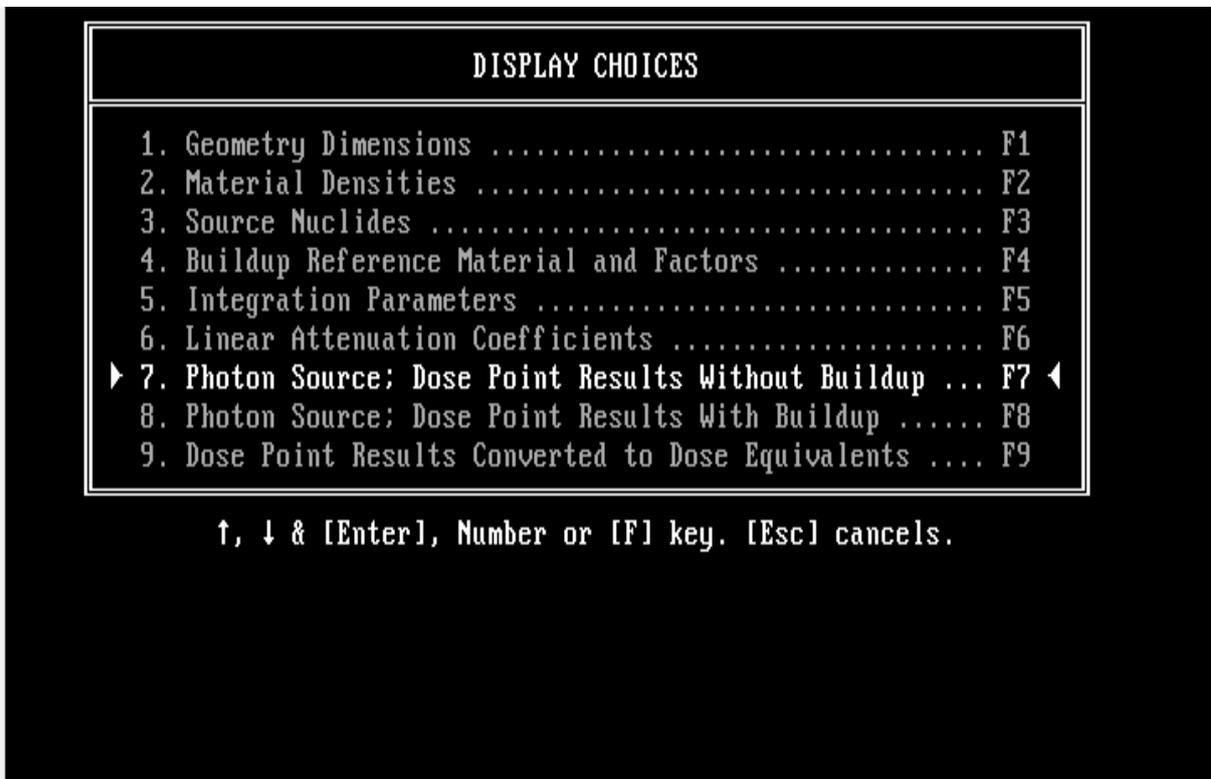


Figura 35: Risultati dell'analisi

| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - NO BUILDUP ---> | | | | | | |
|--|--------------|----------------------|---|--|--------------|---------------------|
| Group # | Energy (MeV) | Activity photons/sec | Fluence Rate photons/cm ² /sec | Energy Fluence Rate MeV/cm ² /sec | Fluence Rate | Exposure Rate mR/hr |
| 7 | .080 | 7.891e+008 | 0.000e+000 | 0.000e+000 | | 0.000e+000 |
| 8 | .100 | 2.367e+009 | 0.000e+000 | 0.000e+000 | | 0.000e+000 |
| 9 | .150 | 1.451e+009 | 0.000e+000 | 0.000e+000 | | 0.000e+000 |
| 10 | .200 | 1.946e+009 | 1.300e-300 | 2.599e-301 | | 0.000e+000 |
| 11 | .300 | 7.212e+009 | 1.038e-130 | 3.113e-131 | | 5.904e-134 |
| 12 | .400 | 8.404e+008 | 2.177e-082 | 8.710e-083 | | 1.697e-085 |
| 13 | .500 | 2.096e+009 | 5.345e-061 | 2.672e-061 | | 5.245e-064 |
| 14 | .600 | 1.870e+009 | 7.005e-050 | 4.203e-050 | | 8.204e-053 |
| 15 | .800 | 4.494e+009 | 7.265e-038 | 5.812e-038 | | 1.105e-040 |
| 16 | 1.000 | 8.013e+012 | 1.894e-028 | 1.894e-028 | | 3.492e-031 |
| 17 | 1.500 | 7.996e+012 | 4.193e-021 | 6.289e-021 | | 1.058e-023 |
| 18 | 2.000 | 3.895e+007 | 1.771e-023 | 3.542e-023 | | 5.477e-026 |
| ----- | | | | | | |
| TOTALS: | | 1.603e+013 | 4.210e-021 | 6.324e-021 | | 1.064e-023 |

Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
 [P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

Figura 36: Risultati analisi non considerando il buildup

| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - WITH BUILDUP ---> | | | | | | |
|--|--------------|----------------------|---|--|--------------|---------------------|
| Group # | Energy (MeV) | Activity photons/sec | Fluence Rate photons/cm ² /sec | Energy Fluence Rate MeV/cm ² /sec | Fluence Rate | Exposure Rate mR/hr |
| 7 | .080 | 7.891e+008 | 4.118e-024 | 3.294e-025 | | 5.213e-028 |
| 8 | .100 | 2.367e+009 | 1.009e-023 | 1.009e-024 | | 1.544e-027 |
| 9 | .150 | 1.451e+009 | 1.086e-023 | 1.630e-024 | | 2.684e-027 |
| 10 | .200 | 1.946e+009 | 2.996e-023 | 5.993e-024 | | 1.058e-026 |
| 11 | .300 | 7.212e+009 | 2.562e-022 | 7.685e-023 | | 1.458e-025 |
| 12 | .400 | 8.404e+008 | 8.137e-023 | 3.255e-023 | | 6.342e-026 |
| 13 | .500 | 2.096e+009 | 3.556e-022 | 1.778e-022 | | 3.490e-025 |
| 14 | .600 | 1.870e+009 | 3.664e-022 | 2.199e-022 | | 4.291e-025 |
| 15 | .800 | 4.494e+009 | 1.061e-021 | 8.488e-022 | | 1.615e-024 |
| 16 | 1.000 | 8.013e+012 | 1.842e-018 | 1.842e-018 | | 3.396e-021 |
| 17 | 1.500 | 7.996e+012 | 2.199e-018 | 3.299e-018 | | 5.551e-021 |
| 18 | 2.000 | 3.895e+007 | 1.294e-021 | 2.589e-021 | | 4.004e-024 |
| ----- | | | | | | |
| TOTALS: | | 1.603e+013 | 7.012e-012 | 2.104e-013 | | 2.085e-015 |

Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
 [P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

Figura 37: Risultati analisi considerando il buildup

| Results (Summed over energies) | Units | Without Buildup | With Buildup |
|---|--------|-----------------|--------------|
| o Isotropic " | " | 8.239e-026 | 7.724e-018 |
| Shallow Dose Equivalent Rate (ICRP 51 - 1987) | | | |
| o Parallel Geometry | mSv/hr | 1.110e-025 | 2.209e-017 |
| o Opposed " | " | 1.076e-025 | 1.517e-017 |
| o Rotational " | " | 1.076e-025 | 1.517e-017 |
| o Isotropic " | " | 8.664e-026 | 1.123e-017 |
| Effective Dose Equivalent Rate (ICRP 51 - 1987) | | | |
| o Anterior/Posterior Geometry | mSv/hr | 9.467e-026 | 8.305e-018 |
| o Posterior/Anterior " | " | 8.800e-026 | 4.064e-018 |
| o Lateral " | " | 7.132e-026 | 2.178e-018 |
| o Rotational " | " | 7.951e-026 | 4.190e-018 |
| o Isotropic " | " | 7.102e-026 | 3.483e-018 |

Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

Figura 38: Risultati complessivi

8 Elaborazione dei dati

8.1 Step 1 : DATABASE

Come primo step sono stati disposti in ordine cronologico tutte le segnalazioni significative dei carichi destinati all'incenerimento a partire dal 16/10/2015 fino al 28/12/2017 per un totale di circa 50 avvenimenti. I dati più rilevanti di questo passaggio vengono mostrati nelle seguenti figure.

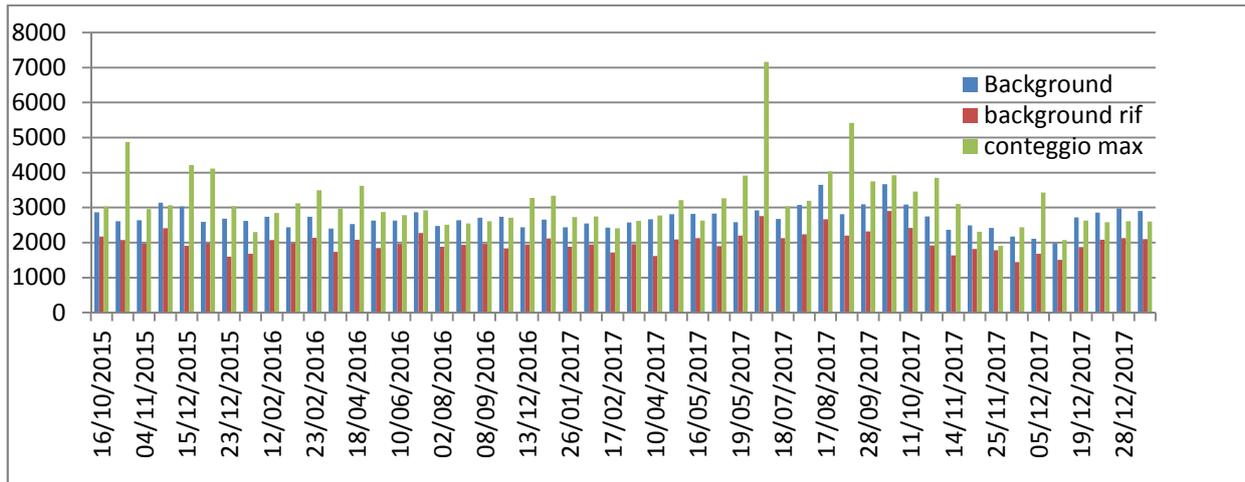


Figura 39: Conteggi forniti dal portale per ogni caso di materiale in ingresso analizzato

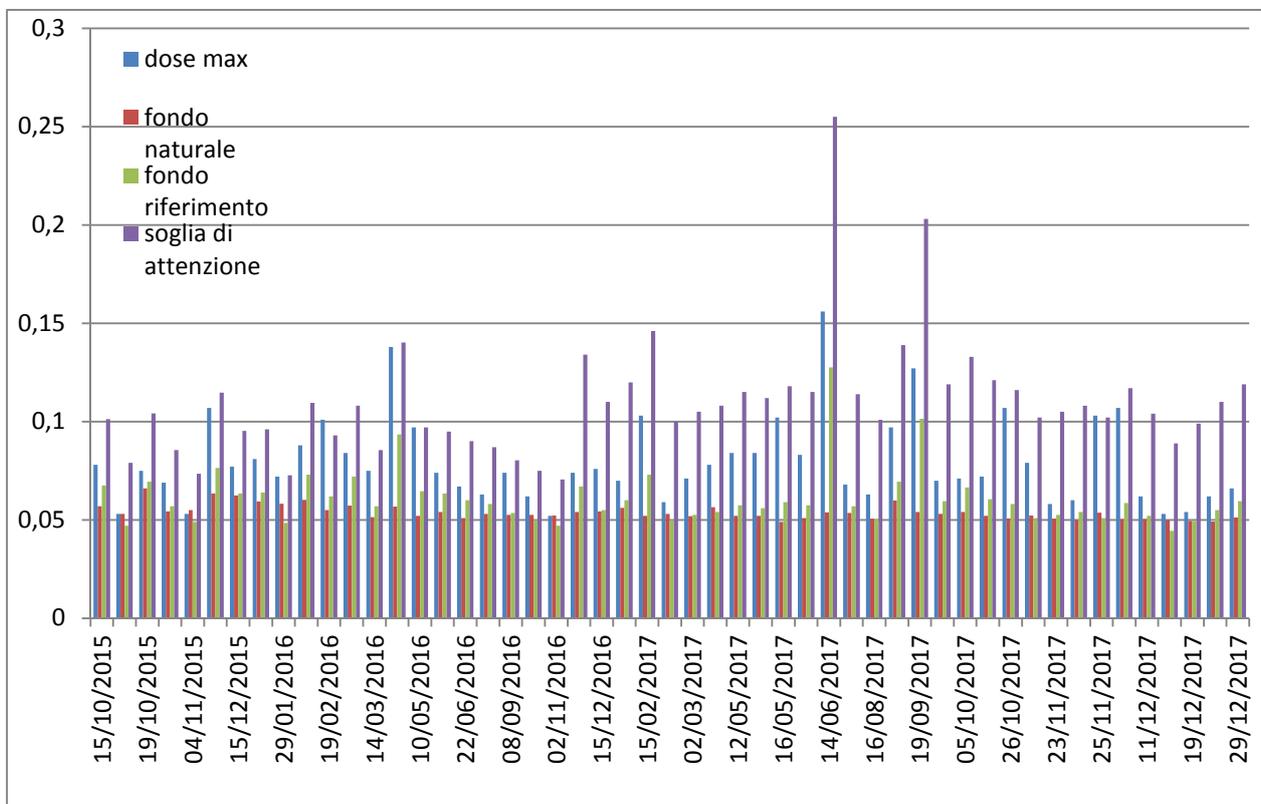


Figura 40: Valori forniti dall'operatore tramite l'uso di un rateometro per ogni caso di carico in ingresso analizzato

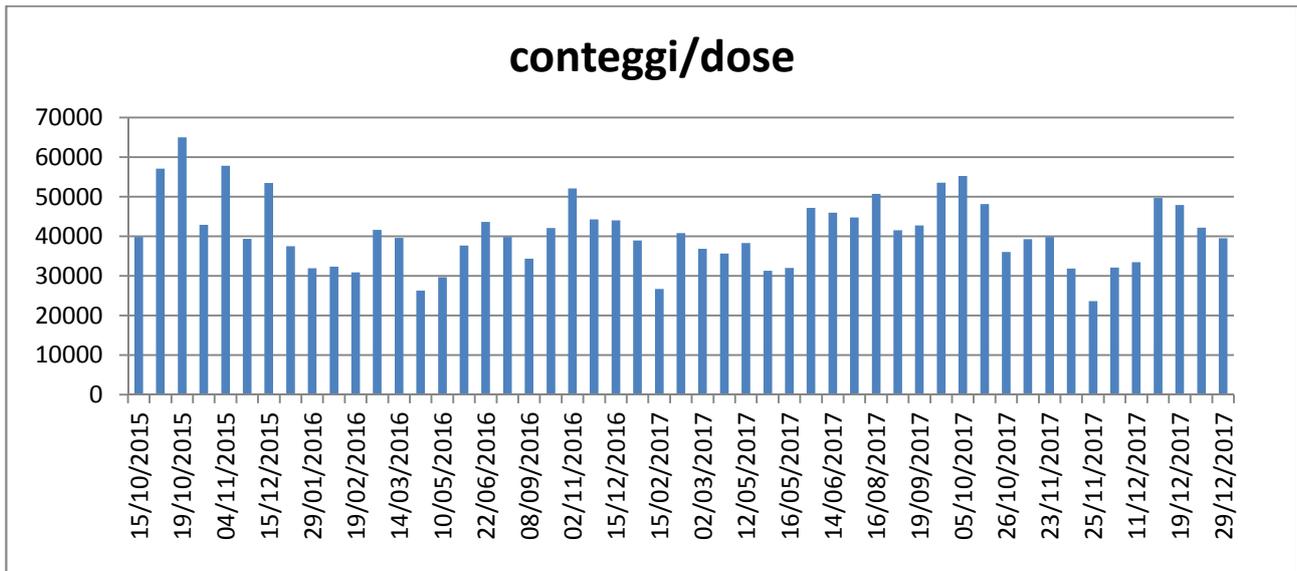


Figura 41: Rapporto tra il valore di conteggio massimo registrato dal portale e la dose massima registrata dall'operatore tramite rateometro per ogni caso di carico in ingresso analizzato.

8.2 Step 2: Carichi in uscita

Come secondo step sono stati analizzati, tramite MicroShield, i carichi in uscita (le ceneri) di composizione nota. Nella simulazione i carichi sono stati considerati omogenei e sono stati utilizzati i valori di geometria e peso fornite dai DDT.

La “sorgente” su MicroShield è stata implementata considerando tutti gli isotopi appartenenti alle catene di decadimento di Torio e Uranio escludendo i radioisotopi con emivita \leq giorni, è stata fatta l’assunzione di *equilibrio secolare*⁵ e, come valori rappresentativi delle concentrazione dei radionuclidi per le catene, sono stati selezionati rispettivamente il Torio 232 e Radio 226 perché più facilmente individuabili con tecniche di spettrometria gamma ad alta risoluzione e quindi grado di incertezza minore.

Le analisi di laboratorio sono state svolte con un Germanio iperpuro utilizzando un campione con geometria 4π (becquerel di Marinelli) e relativa catena di acquisizione, tenendo conto

⁵ L’equilibrio secolare è una condizione fisica relativa ad un isotopo “padre” che decade in un altro isotopo “figlio”; esso si verifica quando la velocità di decadimento del secondo è pari a quella del primo, per cui la quantità dell’isotopo “figlio” rimane costante perché il suo tasso di produzione è uguale al suo tasso di decadimento.

In un minerale tratto da un giacimento indisturbato, per tempi di scala geologica, tutti gli elementi della catena naturale hanno avuto tempo sufficiente per portarsi in condizione di equilibrio secolare con i capostipiti e, di conseguenza, per i NORM l’assunzione di equilibrio secolare è giustificata, lo stesso non si può dire per i TENORM in quanto l’uso industriale va a spezzare la naturale catena di decadimento, andando ad aumentare la concentrazione di un isotopo (in base alla necessità) rispetto alle condizioni naturali.

dell'autoassorbimento; le analisi degli spettri sono state effettuate con software dedicato alla spettrometria gamma.

Di seguito si riportano alcuni esempi di analisi di ceneri leggere e pesanti in cui vengono indicate le attività, espresse in Bq/g, di tutti gli isotopi; per quelli con attività eccessivamente bassa le analisi riportano i valori dei rispettivi MDA (minumul detectable activity).

| Ceneri leggere | Attività, Bq/g | | | | | | | |
|----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ¹³¹ I | ²⁴¹ Am | ²³² Th | ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | ⁴⁰ K |
| 11/04/2017 | 5,24E-03 | < 2,5E-4 | 6E-4 | < 2,3 E-4 | 1,024E-2 | < 6,7E-2 | 2,3E-2 | 8,14E-1 |
| 03/02/2017 | 5,77 E-3 | < 3,3 E-4 | < 8 E-5 | < 3,9 E-4 | 1,2 E-2 | < 6,9 E-4 | 1,7 E-4 | 1,133 |
| 11/10/2016 | 7 E-3 | < 2,4 E-4 | < 5 E-4 | < 4,1 E-4 | 1,3 E-3 | < 9 E-3 | 2 E-2 | 1,01 |
| 05/08/2016 | 4 E-3 | < 7 E-4 | < 1,2 E-3 | < 6 E-4 | 1,1 E-3 | < 2,63 E-1 | 2,1 E-2 | 8 E-1 |
| 09/05/2016 | 7 E-3 | < 2,6 E-4 | 5 E-3 | < 2 E-4 | 1,1 E-3 | < 5,7 E-2 | 1,8 E-2 | 1,29 |

Tabella 3: Analisi di laboratorio condotte su ceneri leggere

| Isotopo | Ceneri pesanti forno rotante- Attività Bq/g | | | |
|---------|---|------------|------------|------------|
| | 11/04/2018 | 29/03/2018 | 26/02/2018 | 29/01/2018 |
| Am 241 | < 1,41 E-4 | <1,3 E-4 | <1,5 E-4 | <1,47 E-3 |
| Cs 137 | 8,63 E-4 | 2,3 E-4 | <4,6 E-4 | 2,9 E-4 |
| I 131 | <9,4 E-5 | <1,1 E-4 | <1,1 E-4 | <2,1 E-4 |
| Co 69 | <1,1 E-4 | <1,1 E-4 | <4,7 E-4 | <1,3 E-4 |
| U 238 | <1,7 E-2 | <1,6 E-2 | <1,5 E-2 | <4,5 E-2 |
| U 234 | <1,4 E-2 | <1,4 E-2 | <1,5 E-2 | <7,1 E-2 |
| Ra 226 | 2,4 E-2 | 2,4 E-2 | 2,1 E-2 | 2,5 E-2 |
| U235 | 7,39 E-4 | 5,33 E-4 | 6,7 E-4 | 5,3 E-4 |
| Th 232 | 1,12 E-2 | 9,24 E-3 | 1,02 E-2 | 1,05 E-2 |
| K 40 | 1,2 E-1 | 9 E-2 | 4,8 E-2 | 1,01 E-1 |

Tabella 4: Analisi di laboratorio condotte su ceneri pesanti

Infine si riportano i risultati ottenuti tramite l'utilizzo di MicroShield per un caso di cenere leggera e per un caso di cenere pesante, ottenuti andando a definire la sorgente sul software ed utilizzando le corrispondenti analisi di laboratorio.

```

MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITHOUT BUILDUP
FILE: CL18717S.MS4
Case Title: ceneri leggere 18 7 2017
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:30 a.m.
| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - NO BUILDUP ---> |
Group  Energy  Activity  | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
#      (MeU)   photons/sec | photons/cm2/sec| MeU/cm2/sec  | mR/hr        |
8      .100   5.667e+004 | 1.064e-006   | 1.064e-007   | 1.627e-010   |
9      .150   1.225e+004 | 8.929e-006   | 1.339e-006   | 2.205e-009   |
10     .200   2.205e+005 | 5.048e-004   | 1.010e-004   | 1.782e-007   |
11     .300   2.033e+005 | 1.177e-003   | 3.531e-004   | 6.698e-007   |
12     .400   2.477e+005 | 2.313e-003   | 9.252e-004   | 1.803e-006   |
13     .500   4.997e+004 | 6.494e-004   | 3.247e-004   | 6.374e-007   |
14     .600   3.931e+005 | 6.599e-003   | 3.960e-003   | 7.729e-006   |
15     .800   1.491e+005 | 3.696e-003   | 2.957e-003   | 5.624e-006   |
16     1.000  3.609e+005 | 1.202e-002   | 1.202e-002   | 2.215e-005   |
17     1.500  1.594e+005 | 8.836e-003   | 1.325e-002   | 2.230e-005   |
18     2.000  1.695e+005 | 1.296e-002   | 2.591e-002   | 4.007e-005   |
19     3.000  1.008e+005 | 1.139e-002   | 3.417e-002   | 4.636e-005   |
TOTALS: 2.455e+006 | 6.015e-002   | 9.398e-002   | 1.475e-004   |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

```

Figura 42: Esempio risultati senza build up di ceneri leggere

```

MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITH BUILDUP
FILE: CL18717S.MS4
Case Title: ceneri leggere 18 7 2017
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:30 a.m.
| <-- RESULTS AT THE DOSE POINT - WITH BUILDUP --> |
Group  Energy  Activity  | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
#      (MeU)   photons/sec | photons/cm2/sec| MeU/cm2/sec  | mR/hr        |
8      .100   5.667e+004 | 2.600e-006   | 2.600e-007   | 3.978e-010   |
9      .150   1.225e+004 | 3.093e-005   | 4.640e-006   | 7.641e-009   |
10     .200   2.205e+005 | 2.198e-003   | 4.395e-004   | 7.757e-007   |
11     .300   2.033e+005 | 5.908e-003   | 1.772e-003   | 3.362e-006   |
12     .400   2.477e+005 | 1.169e-002   | 4.677e-003   | 9.113e-006   |
13     .500   4.997e+004 | 3.139e-003   | 1.570e-003   | 3.081e-006   |
14     .600   3.931e+005 | 3.009e-002   | 1.805e-002   | 3.523e-005   |
15     .800   1.491e+005 | 1.498e-002   | 1.198e-002   | 2.279e-005   |
16     1.000  3.609e+005 | 4.388e-002   | 4.388e-002   | 8.089e-005   |
17     1.500  1.594e+005 | 2.652e-002   | 3.978e-002   | 6.693e-005   |
18     2.000  1.695e+005 | 3.457e-002   | 6.914e-002   | 1.069e-004   |
19     3.000  1.008e+005 | 2.596e-002   | 7.789e-002   | 1.057e-004   |
TOTALS: 2.455e+006 | 1.990e-001   | 2.692e-001   | 4.348e-004   |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

```

Figura 43: Esempio risultati con build up di ceneri leggere

```

MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITHOUT BUILDUP
FILE: CP28218S.MS4
Case Title: 28 feb 2018 cenerei pesante
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:24 a.m.
| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - NO BUILDUP ---> |
Group  Energy  Activity  | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
#      (MeU)   photons/sec | photons/cm²/sec| MeU/cm²/sec   | mR/hr        |
8      .100   6.262e+004 | 1.199e-006   | 1.199e-007   | 1.835e-010   |
9      .150   1.631e+004 | 1.184e-005   | 1.775e-006   | 2.924e-009   |
10     .200   2.715e+005 | 6.094e-004   | 1.219e-004   | 2.151e-007   |
11     .300   2.253e+005 | 1.263e-003   | 3.788e-004   | 7.186e-007   |
12     .400   2.439e+005 | 2.190e-003   | 8.761e-004   | 1.707e-006   |
13     .500   6.304e+004 | 7.842e-004   | 3.921e-004   | 7.696e-007   |
14     .600   4.162e+005 | 6.663e-003   | 3.998e-003   | 7.803e-006   |
15     .800   1.785e+005 | 4.194e-003   | 3.355e-003   | 6.381e-006   |
16     1.000  4.124e+005 | 1.295e-002   | 1.295e-002   | 2.387e-005   |
17     1.500  6.029e+005 | 3.124e-002   | 4.686e-002   | 7.884e-005   |
18     2.000  1.655e+005 | 1.176e-002   | 2.353e-002   | 3.638e-005   |
19     3.000  1.355e+005 | 1.417e-002   | 4.251e-002   | 5.768e-005   |
-----|-----|-----|
TOTALS: 3.164e+006 | 8.584e-002   | 1.350e-001   | 2.144e-004   |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

```

Figura 44: Esempio risultati cenerei pesanti senza build up

```

MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITH BUILDUP
FILE: CP28218S.MS4
Case Title: 28 feb 2018 cenerei pesante
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:24 a.m.
| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - WITH BUILDUP ---> |
Group  Energy  Activity  | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
#      (MeU)   photons/sec | photons/cm²/sec| MeU/cm²/sec   | mR/hr        |
8      .100   6.262e+004 | 2.934e-006   | 2.934e-007   | 4.488e-010   |
9      .150   1.631e+004 | 4.076e-005   | 6.114e-006   | 1.007e-008   |
10     .200   2.715e+005 | 2.627e-003   | 5.254e-004   | 9.272e-007   |
11     .300   2.253e+005 | 6.258e-003   | 1.877e-003   | 3.561e-006   |
12     .400   2.439e+005 | 1.092e-002   | 4.366e-003   | 8.507e-006   |
13     .500   6.304e+004 | 3.735e-003   | 1.867e-003   | 3.666e-006   |
14     .600   4.162e+005 | 2.992e-002   | 1.795e-002   | 3.504e-005   |
15     .800   1.785e+005 | 1.674e-002   | 1.339e-002   | 2.547e-005   |
16     1.000  4.124e+005 | 4.658e-002   | 4.658e-002   | 8.587e-005   |
17     1.500  6.029e+005 | 9.248e-002   | 1.387e-001   | 2.334e-004   |
18     2.000  1.655e+005 | 3.101e-002   | 6.203e-002   | 9.592e-005   |
19     3.000  1.355e+005 | 3.207e-002   | 9.620e-002   | 1.305e-004   |
-----|-----|-----|
TOTALS: 3.164e+006 | 2.724e-001   | 3.835e-001   | 6.229e-004   |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.

```

Figura 45: Esempio risultati cenerei pesanti con build up

L'efficienza del portale alla rivelazione dei fotoni non è costante ma varia in funzione delle loro energie, tuttavia non avendo a disposizione i dettagli tecnici relativi ad essa, la si è ipotizzata costante. Tramite questa assunzione, per trovare le correlazioni tra i dati teorici trovati con MicroShield ed i conteggi forniti dal portale al passaggio degli stessi carichi, è possibile, in prima

approssimazione, andare a riportare il numero di fotoni al secondo, calcolati con il software, con l'incremento del portale, ovvero la differenza fra il valore massimo registrato e soglia del portale stesso.

| Tipo | Fotoni/secondo | Incremento conteggi | Fotoni/secondo/incremento |
|----------------|----------------|---------------------|---------------------------|
| Ceneri pesanti | 3,55E+06 | 1,08E+03 | 3,28E+03 |
| Ceneri pesanti | 3,16E+06 | 8,22E+02 | 3,85E+03 |
| Ceneri leggere | 4,32E+06 | 1,63E+03 | 2,64E+03 |
| Ceneri leggere | 2,46E+06 | 1,42E+03 | 1,73E+03 |

Tabella 5: Risultati step 2

Il rapporto sia per le ceneri pesanti che per quelle leggere si attesta su un range di valori limitato (tra 1,7 e 2,7 per le ceneri leggere e tra 3,2 e 3,8 per le ceneri pesanti), la cui ampiezza è legata alla statistica e alle assunzioni precedentemente fatte, ma risulta comunque accettabile per i successivi step.

8.3 Step 3: Carichi in ingresso

Analogamente a prima si è valutato il rapporto tra fotoni/secondo e l'incremento del portale per differenti tipologie di carichi in ingresso.

Di seguito vengono riportati i risultati di tre casi-studio per i quali erano note le misure di laboratorio.

| Tipo carico | Fotoni/secondo | Flusso Fotoni/secondo/cm ² | Energia dei fotoni Mev/secondo/cm ² | Rateo di esposizione mR/ora | Incremento conteggi | Fotoni/secondo/Conteggi |
|-------------|----------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|---------------------|-------------------------|
| Cer-191211 | 2,63E+06 | 1,99E-1 | 2,65E-1 | 4,29E-4 | 1047 | 2,51E+03 |
| Cer-191211* | 1,75E+06 | 1,58E-1 | 2,04E-1 | 3,37E-3 | 591 | 2,96E+03 |
| Cer-050109* | 1,06E+07 | 9,31E-1 | 1,239 | 2,01E-3 | 3224 | 3,28E+03 |

Tabella 6: Risultati di alcuni casi studio analizzati

Una volta determinato questo rapporto sono stati calcolati, tramite MicroShield, i valori di fotoni/secondo corrispondenti alle concentrazioni di attività, accettabili secondo la direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre dei radionuclidi. I valori di concentrazione di attività utilizzati sono quelli relativi all'allontanamento di materiali solidi per il riutilizzo, il riciclo, lo

smaltimento tradizionale o l'incenerimento, quando si è in presenza di radionuclidi naturali, nelle sostanze solide, in equilibrio secolare con i loro prodotti di filiazione.

Sono state prese in considerazione due differenti configurazioni a cui attribuire l'incremento del portale: materiale radioattivo uniformemente distribuito e materiale radioattivo concentrato; utilizzando quindi i risultati ottenuti, sono stati riesaminati, considerando entrambe le configurazioni, i carichi in ingresso organizzati nel database, per accertare la corretta gestione degli allarmi radiometrici.

8.3.1 Configurazione uniforme

Per diverse tipologie di carico sono stati considerati i dati forniti nei DDT in modo da calcolare una densità media nella stima dei valori accettabili. La "sorgente" su Microshield è stata considerata uniformemente distribuita all'interno del camion.

| Tipologia carico | Fotoni/secondo | Flusso Fotoni/secondo/cm ² | Energia dei fotoni Mev/secondo/cm ² | Rateo di esposizione mR/ora |
|------------------|----------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| cer 191211 | 1,34E+08 | 4,73E-01 | 9,49E-01 | 1,39E-03 |
| cer 191211* | 9,93E+07 | 3,51E-01 | 7,03E-01 | 1,03E-03 |
| cer-050109* | 1,196E+08 | 6,19E-1 | 1,1 | 1,66-03 |

Tabella 7: Risultati ottenuti con concentrazione di ogni isotopo pari ai valori accettabili secondo la direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre, per configurazione uniforme

Andando a dividere i fotoni/secondo, appena trovati, di ogni tipologia di carico per il corrispondente rapporto trovato precedentemente si ricava l'ordine di grandezza dell'incremento del portale entro cui un'anomalia possa essere considerata accettabile.

| Tipologia carico | Fotoni/secondo | Fotoni/secondo/Conteggi | Incremento |
|------------------|----------------|-------------------------|------------|
| cer 191211 | 1,34E+08 | 2,51E+03 | 5,3E+04 |
| cer 191211* | 9,93E+07 | 2,96E+03 | 3,4E+04 |
| cer-050109* | 1,196E+08 | 3,28E+03 | 3,6E+04 |

Tabella 8: Risultati per configurazione uniforme

In base ai calcoli effettuati si può dedurre che nel caso in cui venga segnalato un allarme radiometrico da parte del portale con tipologia 4, il suo incremento debba essere minore di 10⁴ per poter essere ritenuto tollerabile.

8.3.2 Configurazione concentrata

La sorgente è stata ipotizzata essere di 1m³ e concentrata nel baricentro del cassone (condizione conservativa in quanto la restante parte del carico funge da schermo).

| Tipologia carico | Fotoni/secondo | Flusso Fotoni/secondo/cm ² | Energia dei fotoni Mev/secondo/cm ² | Rateo di esposizione mR/ora |
|------------------|----------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| cer 191211* | 4,17E+06 | 2,52E-24 | 2,07E-24 | 3,64E-27 |
| cer 191211 | 2,581E+06 | 2,97E-24 | 2,32E-24 | 4,1E-27 |
| cer-050109* | 3,68E+06 | 3,61E-24 | 5,46E-24 | 8,74E-27 |

Tabella 9: Risultati ottenuti con concentrazione di ogni isotopo pari ai valori accettabili secondo la direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre, per configurazione concentrata

Analogamente a prima si è andato a valutare l'ordine di grandezza che deve avere l'incremento del portale.

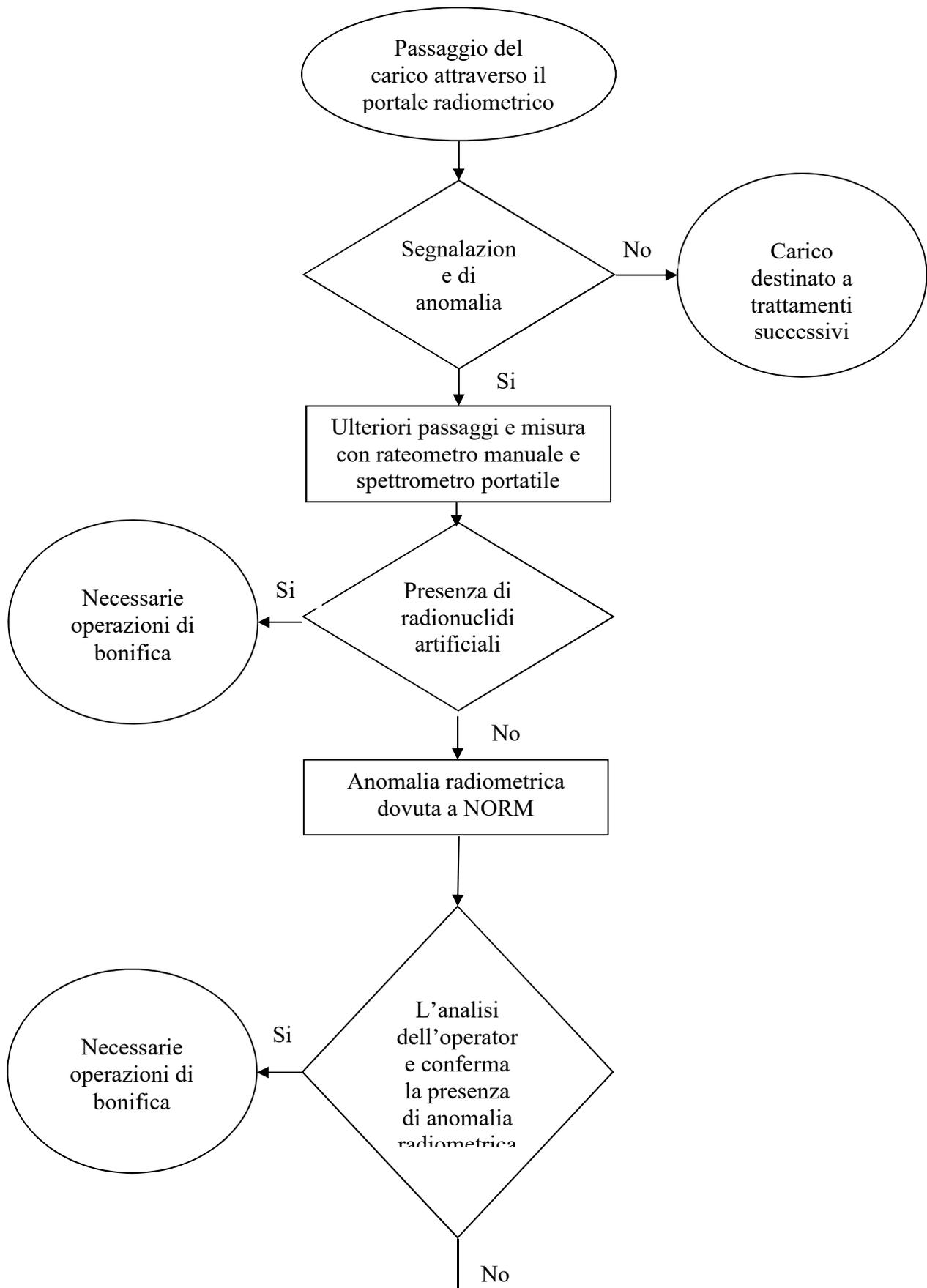
| Tipologia carico | Fotoni/secondo | Fotoni/secondo/Conteggi | Incremento |
|------------------|----------------|-------------------------|------------|
| cer 191211* | 4,17E+06 | 2,51E+03 | 1,7E+03 |
| cer 191211 | 2,581E+06 | 2,96E+03 | 800 |
| cer-050109* | 3,68E+06 | 3,28E+03 | 1,1E+03 |

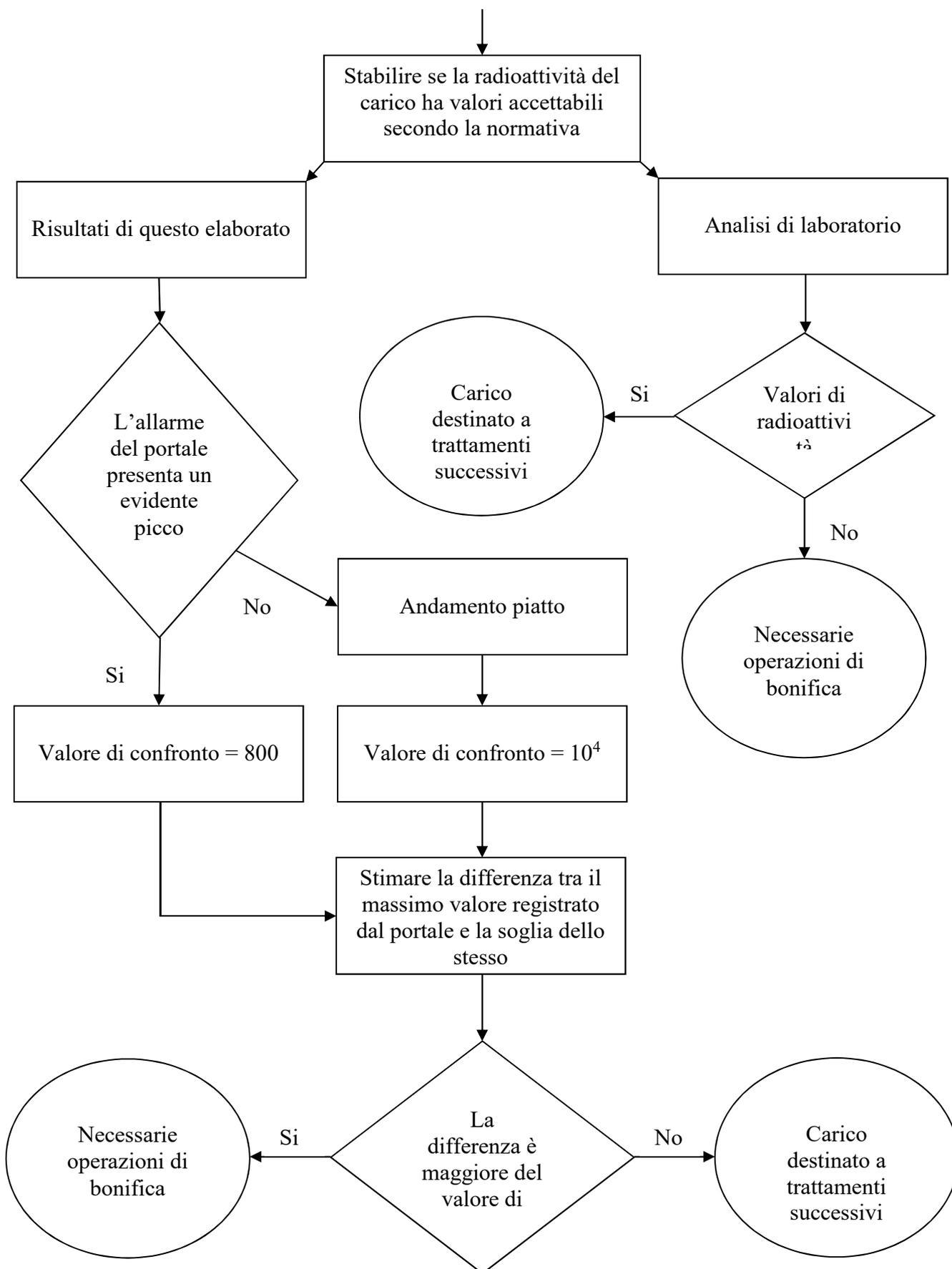
Tabella 10: Risultati per configurazione concentrata

In base ai calcoli effettuati si può dedurre che nel caso in cui venga segnalato un allarme radiometrico da parte del portale con tipologia 2, il suo incremento debba essere minore di 10³ per poter essere ritenuto tollerabile

Infine, avendo ottenuto da MicroShield i valori ammissibili per le diverse tipologie di carico, sono state confrontate tutte le anomalie radiometriche di interesse con i relativi casi accettabili e si è, come ultimo step, verificato che le scelte effettuate dall'esperto qualificato siano state corrette.

9 Proposta di gestione dei carichi in ingresso





Come si evince dal diagramma di flusso, viene fatto passare il veicolo attraverso il portale radiometrico e qualora esso rilevasse la presenza di un'anomalia, il carico deve essere fermato per

condurre ulteriori analisi che prevedono altri tre passaggi attraverso il portale stesso e un'analisi manuale, da parte di un operatore, effettuata mediante rateometro portatile. Se l'analisi confermasse la presenza dell'anomalia e ne rilevasse la localizzazione spaziale, si procederebbe con le operazioni di bonifica; in caso contrario, bisogna stabilire se la radioattività presente nel carico sia accettabile secondo la normativa; per fare ciò normalmente si effettuano analisi di laboratorio, procedure non sempre attuabili a causa dei costi ad esse associati.

I risultati di questo elaborato possono essere utilizzati come supporto per determinare i livelli di radioattività del carico senza ricorrere alle analisi di laboratorio solamente se l'anomalia radiometrica fosse attribuibile a NORM. In particolare, se la tipologia di allarme segnalato dal portale avesse un picco accentuato, con un certo grado di approssimazione si può affermare che se la differenza tra la soglia del portale ed il massimo valore di conteggi registrato fosse inferiore a 800, l'anomalia radiometrica avrà livelli di radioattività accettabili ed il carico, quindi, può essere destinato all'incenerimento; se invece la differenza fosse maggiore occorrerà effettuare le operazioni di bonifica standard.

Nel caso in cui l'allarme segnalato dal portale avesse un andamento piatto il discorso è analogo a quanto descritto precedentemente ed il valore discriminante è circa 10^4 .

10 Conclusioni

In questo elaborato è stato mostrato come avviene la gestione dei materiali solidi destinati all'incenerimento presso un impianto di termovalorizzazione che, non trattando rifiuti radioattivi, deve assicurarsi di non immettere nel ciclo produttivo materiali contaminati.

Si è mostrato come avviene il controllo, come funzionano nel dettaglio gli apparecchi utilizzati ed a quale normativa fare riferimento in caso di necessità.

Dallo studio dei dati storici è stata individuata una metodologia di gestione dei carichi che presentano una compatibilità a presenza di NORM e TENORM e per i quali, senza effettuare manipolazione del carico e complesse misure di laboratorio, possa essere gestita l'anomalia radiometrica basandosi sui dati forniti dal sistema portale. Si sono ottenuti valori di correlazione tra il flusso di fotoni emergente da un carico che contiene materiale radioattivo naturale a concentrazioni compatibili con l'incenerimento ed il relativo incremento dei conteggi del portale determinato dal passaggio di tali carichi. In questo modo i carichi che producono un'anomalia possono essere gestiti attraverso l'impiego di uno spettrometro portatile, per l'effettuazione di analisi puramente qualitative atte ad escludere la presenza di radionuclidi artificiali, ed un confronto dei dati forniti dal portale con il massimo incremento compatibile secondo la normativa.

11 Bibliografia

- [1] Glenn F. Knoll – “*Radiation detection and measurement*” *Second Edition*, Wiley International Edition, 1989
- [2] James E. Turner – “*Atoms, Radiations, and Radiation Protection*”, Pergamon Press, 1986
- [3] *Scintillation Detectors* – Saint Gobain Industrielles – Marzo 1992
- [4] *BICRON Scintillation Products* – Ottobre 1993
- [5] Thomas E. Johnson, Brian K. Birky-“ *Health Physics and Radiological Health* “ Fourth Edition, Wolters Kluwer, 2011
- [6] Manuale d’uso Programma MicroShield 4.2 Grove Engineering Inc.
- [7] “Normativa di riferimento - Rifiuti radioattivi e combustibile nucleare esaurito”. Sviluppo economico.gov.it. Ministero dello sviluppo economico
- [8] “Practical use of the concepts of clearance and exemption”, Radiation Protection 122
- [9] Direttiva 2013/59 EURATOM Del Consiglio del 5 dicembre 2013

12 Appendice

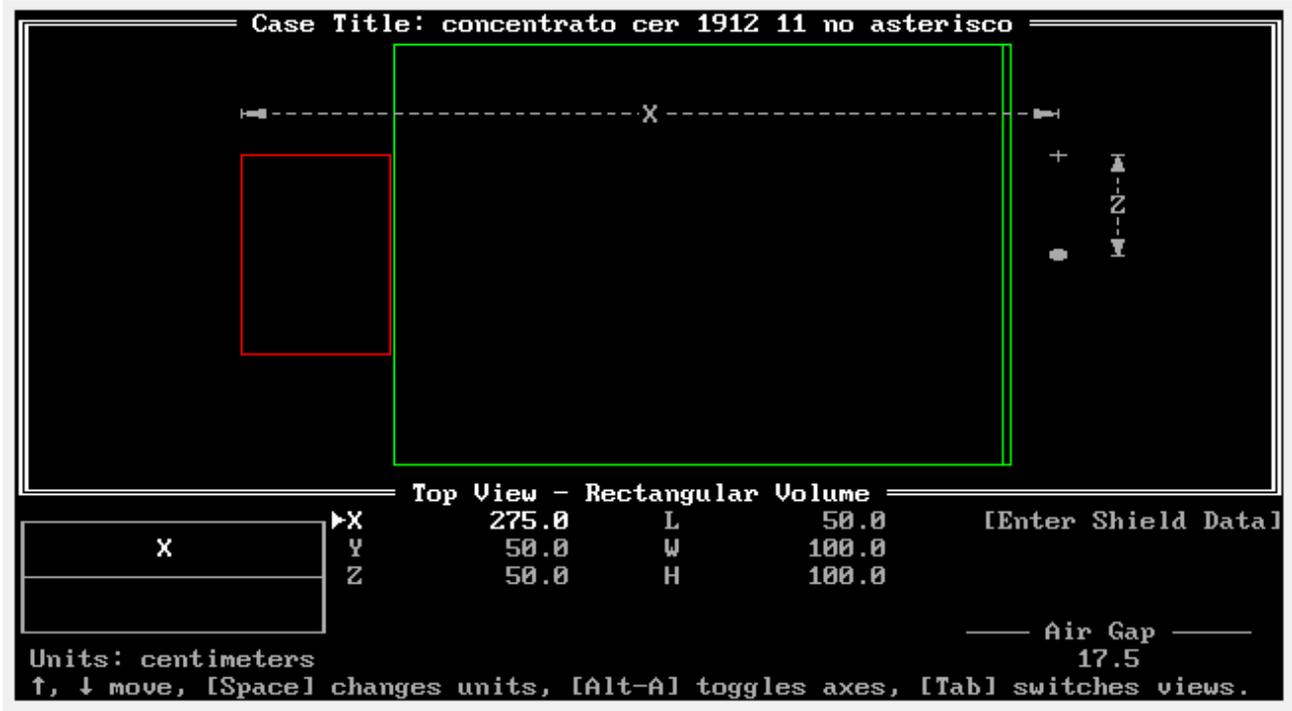


Figura 46: Caso studio configurazione concentrata pag. 1

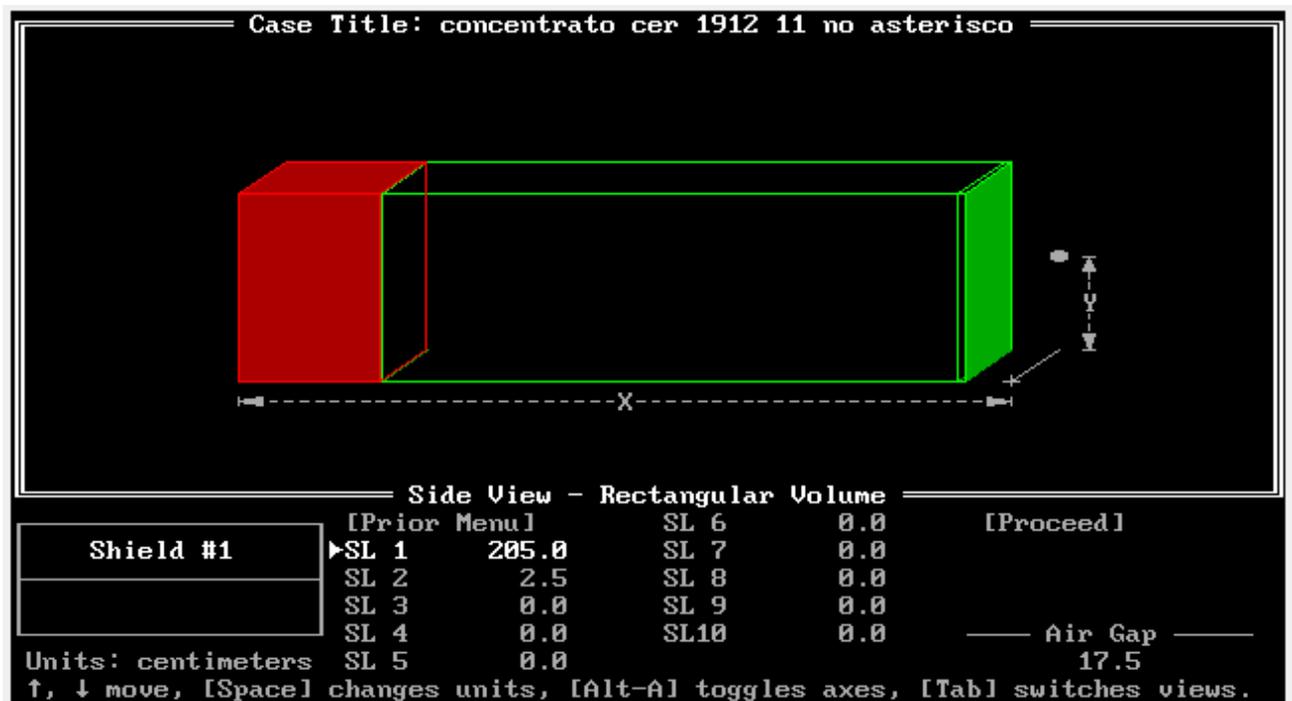


Figura 47: Caso studio configurazione concentrata pag. 2

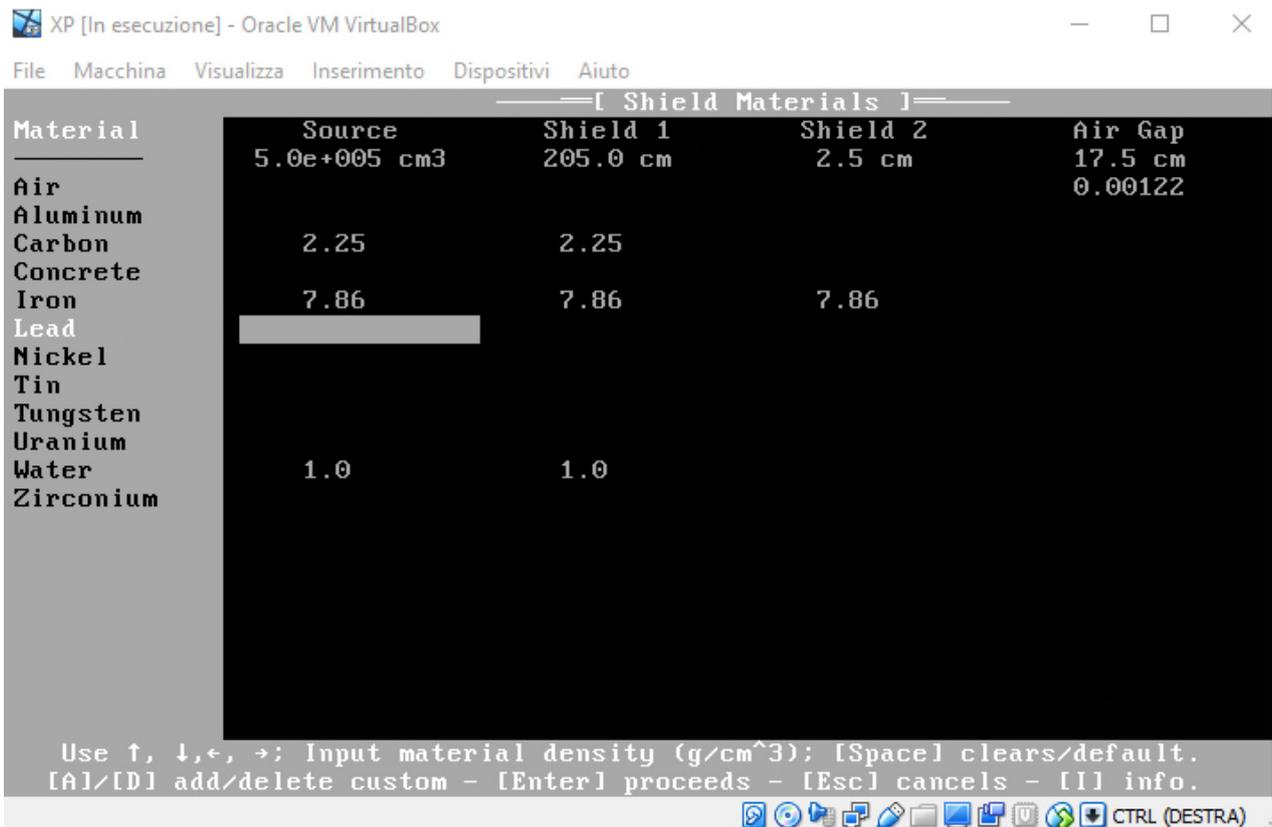


Figura 48: Caso studio configurazione concentrata pag. 3

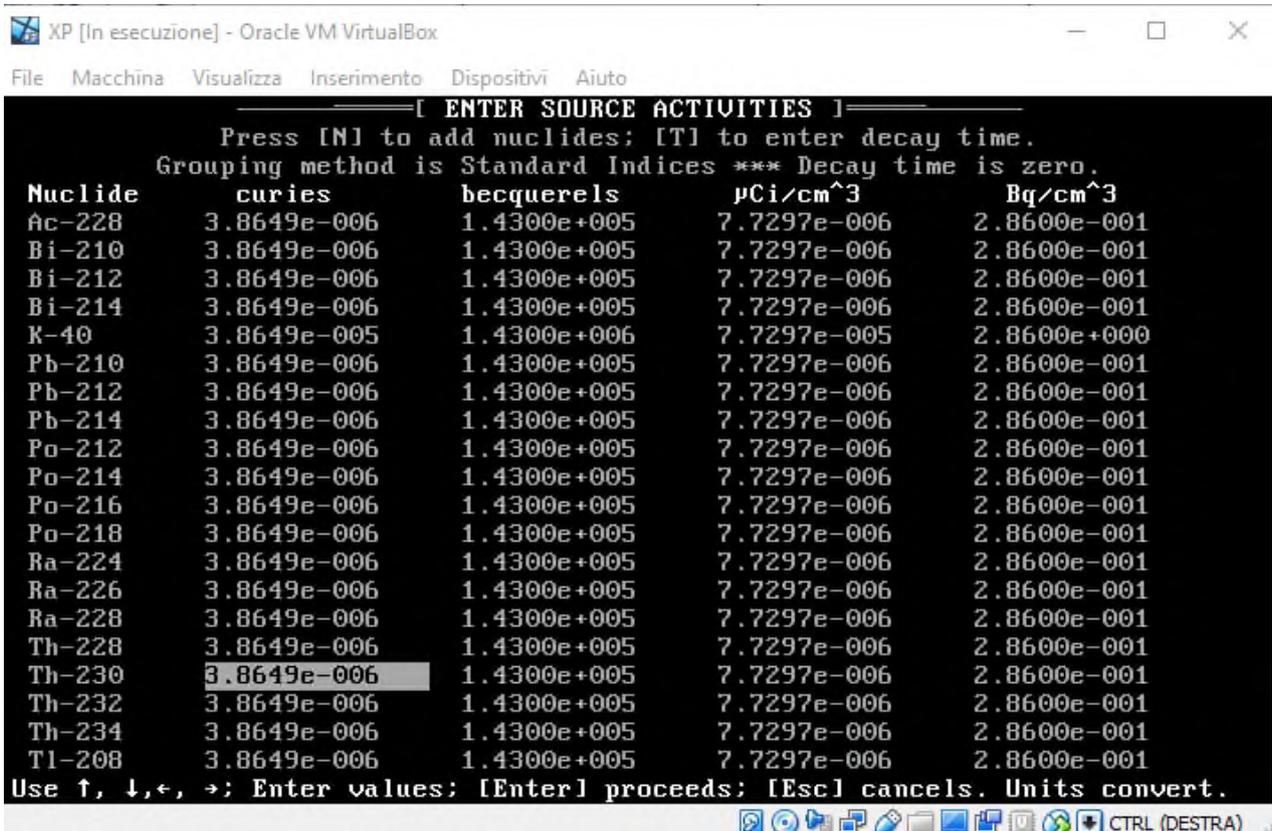


Figura 49: Caso studio configurazione concentrata pag. 4

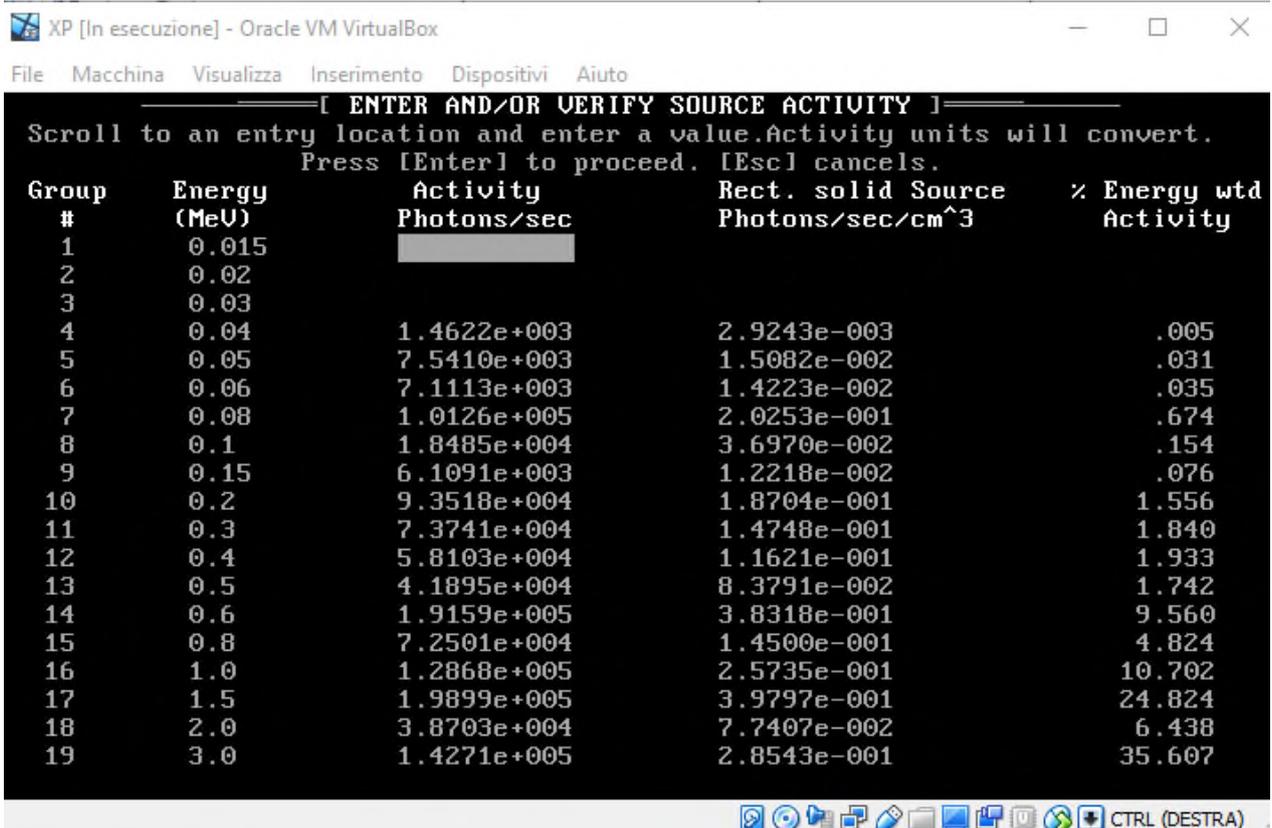


Figura 50: Caso studio configurazione concentrata pag. 5

```

XP [In esecuzione] - Oracle VM VirtualBox
File Macchina Visualizza Inserimento Dispositivi Aiuto
MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITHOUT BUILDUP
FILE: CONCENT2.MS4
Case Title: concentrato cer 1912 11 no asterisco
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 8:57 a.m.
| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - NO BUILDUP ---> |
Group Energy Activity | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
# (MeV) photons/sec | photons/cm²/sec| MeU/cm²/sec | mR/hr |
8 .100 4.119e+004 | 5.002e-293 | 5.002e-294 | 7.653e-297 |
9 .150 4.886e+004 | 1.471e-174 | 2.207e-175 | 3.634e-178 |
10 .200 8.918e+005 | 4.931e-138 | 9.862e-139 | 1.741e-141 |
11 .300 9.035e+004 | 1.941e-111 | 5.824e-112 | 1.105e-114 |
12 .400 7.111e+004 | 6.532e-098 | 2.613e-098 | 5.091e-101 |
13 .500 5.439e+004 | 5.840e-089 | 2.920e-089 | 5.732e-092 |
14 .600 2.345e+005 | 1.504e-081 | 9.022e-082 | 1.761e-084 |
15 .800 9.054e+004 | 4.486e-072 | 3.589e-072 | 6.826e-075 |
16 1.000 1.575e+005 | 9.874e-065 | 9.874e-065 | 1.820e-067 |
17 1.500 2.435e+005 | 4.491e-053 | 6.737e-053 | 1.133e-055 |
18 2.000 4.736e+004 | 3.806e-047 | 7.612e-047 | 1.177e-049 |
19 3.000 1.746e+005 | 2.760e-039 | 8.279e-039 | 1.123e-041 |
TOTALS: 2.581e+006 | 2.760e-039 | 8.279e-039 | 1.123e-041 |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.
CTRL (DESTRA)

```

Figura 51: Caso studio configurazione concentrata pag. 6

```

XP [In esecuzione] - Oracle VM VirtualBox
File Macchina Visualizza Inserimento Dispositivi Aiuto
MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITH BUILDUP
FILE: CONCENT2.MS4
Case Title: concentrato cer 1912 11 no asterisco
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 8:57 a.m.
| <-- RESULTS AT THE DOSE POINT - WITH BUILDUP --> |
Group Energy Activity | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
# (MeV) photons/sec | photons/cm²/sec| MeU/cm²/sec | mR/hr |
8 .100 4.119e+004 | 1.930e-027 | 1.930e-028 | 2.953e-031 |
9 .150 4.886e+004 | 8.413e-027 | 1.262e-027 | 2.078e-030 |
10 .200 8.918e+005 | 4.775e-025 | 9.549e-026 | 1.685e-028 |
11 .300 9.035e+004 | 1.561e-025 | 4.682e-026 | 8.881e-029 |
12 .400 7.111e+004 | 2.301e-025 | 9.203e-026 | 1.793e-028 |
13 .500 5.439e+004 | 1.771e-025 | 8.853e-026 | 1.738e-028 |
14 .600 2.345e+005 | 8.271e-025 | 4.962e-025 | 9.686e-028 |
15 .800 9.054e+004 | 2.604e-025 | 2.084e-025 | 3.963e-028 |
16 1.000 1.575e+005 | 3.258e-025 | 3.258e-025 | 6.005e-028 |
17 1.500 2.435e+005 | 3.076e-025 | 4.614e-025 | 7.763e-028 |
18 2.000 4.736e+004 | 4.710e-026 | 9.420e-026 | 1.457e-028 |
19 3.000 1.746e+005 | 1.377e-025 | 4.132e-025 | 5.606e-028 |
TOTALS: 2.581e+006 | 2.969e-024 | 2.324e-024 | 4.062e-027 |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.
CTRL (DESTRA)

```

Figura 52: Caso studio configurazione concentrata pag. 7

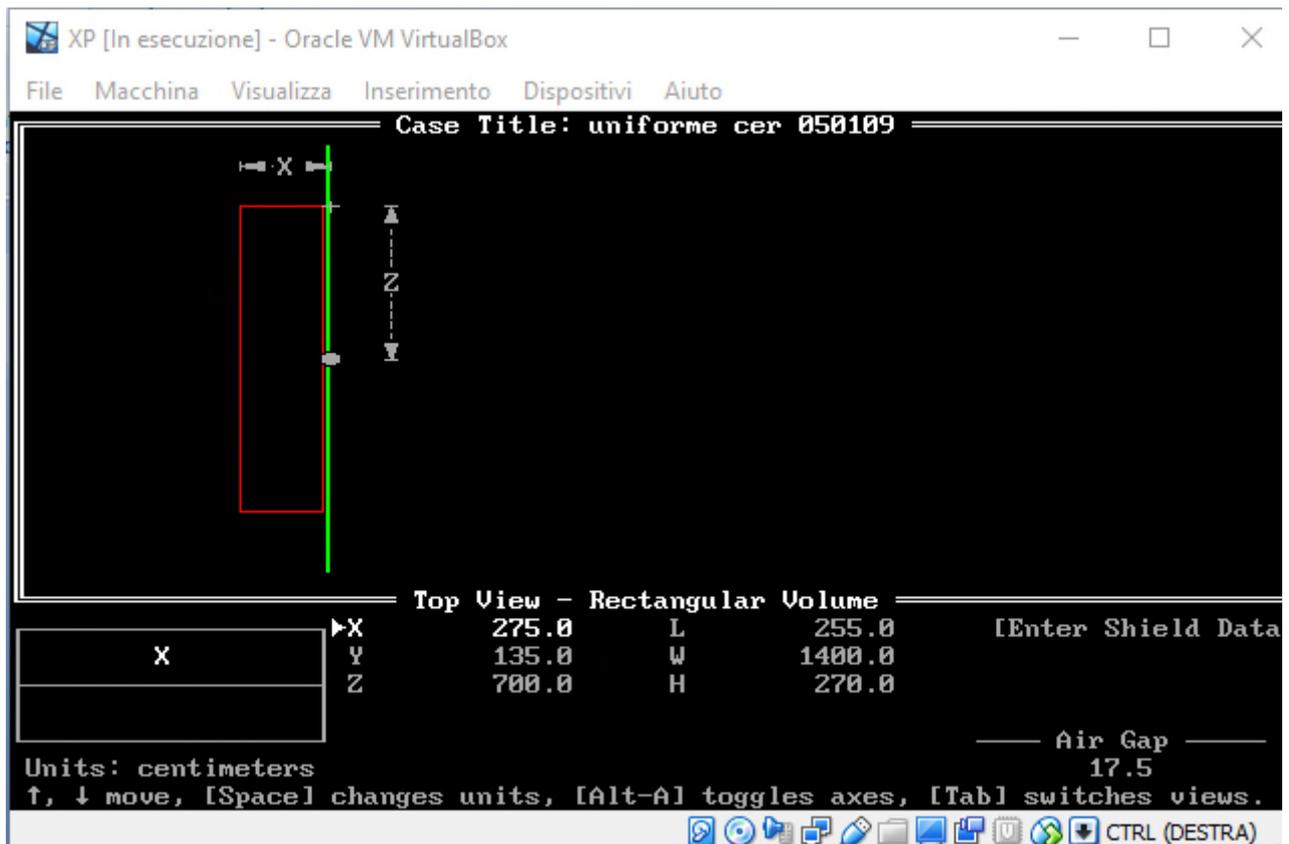


Figura 53: Caso studio configurazione uniforme pag. 1

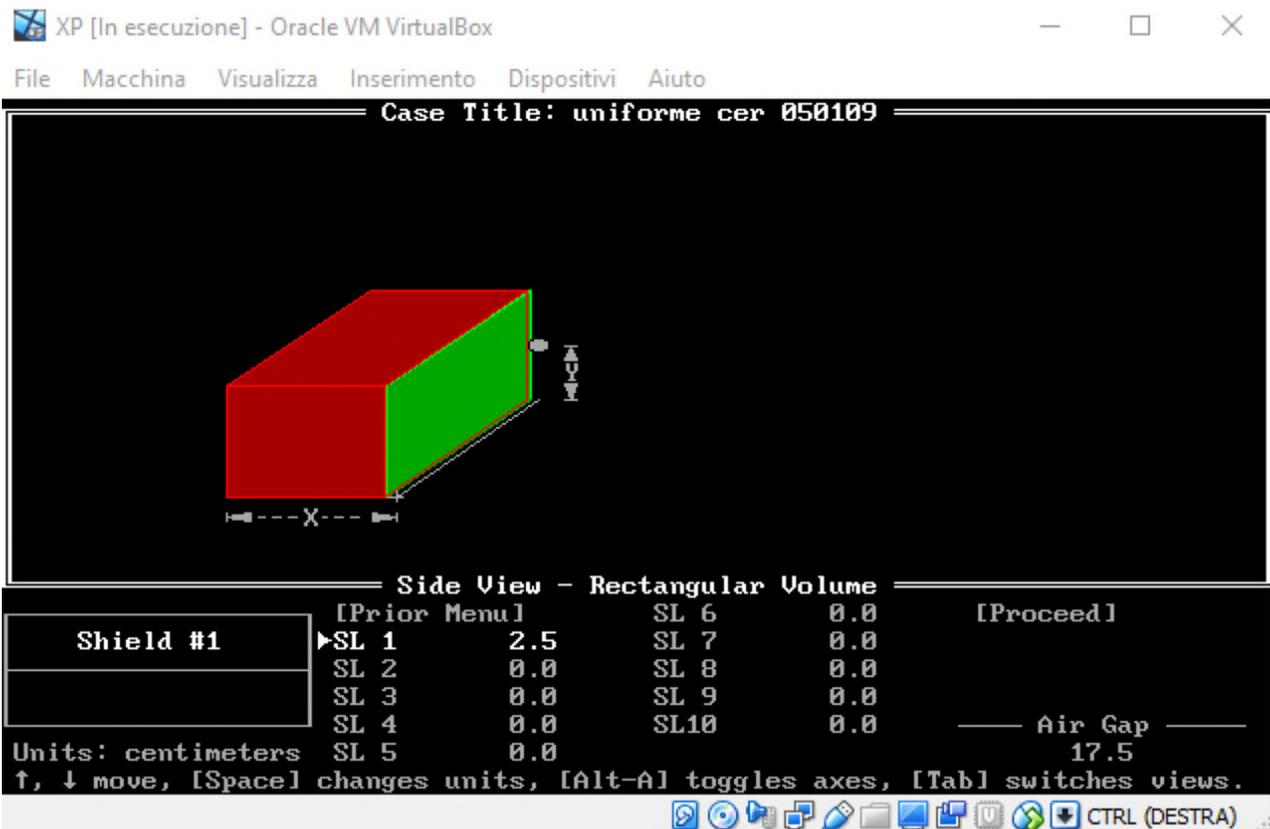


Figura 54: Caso studio configurazione uniforme pag. 2

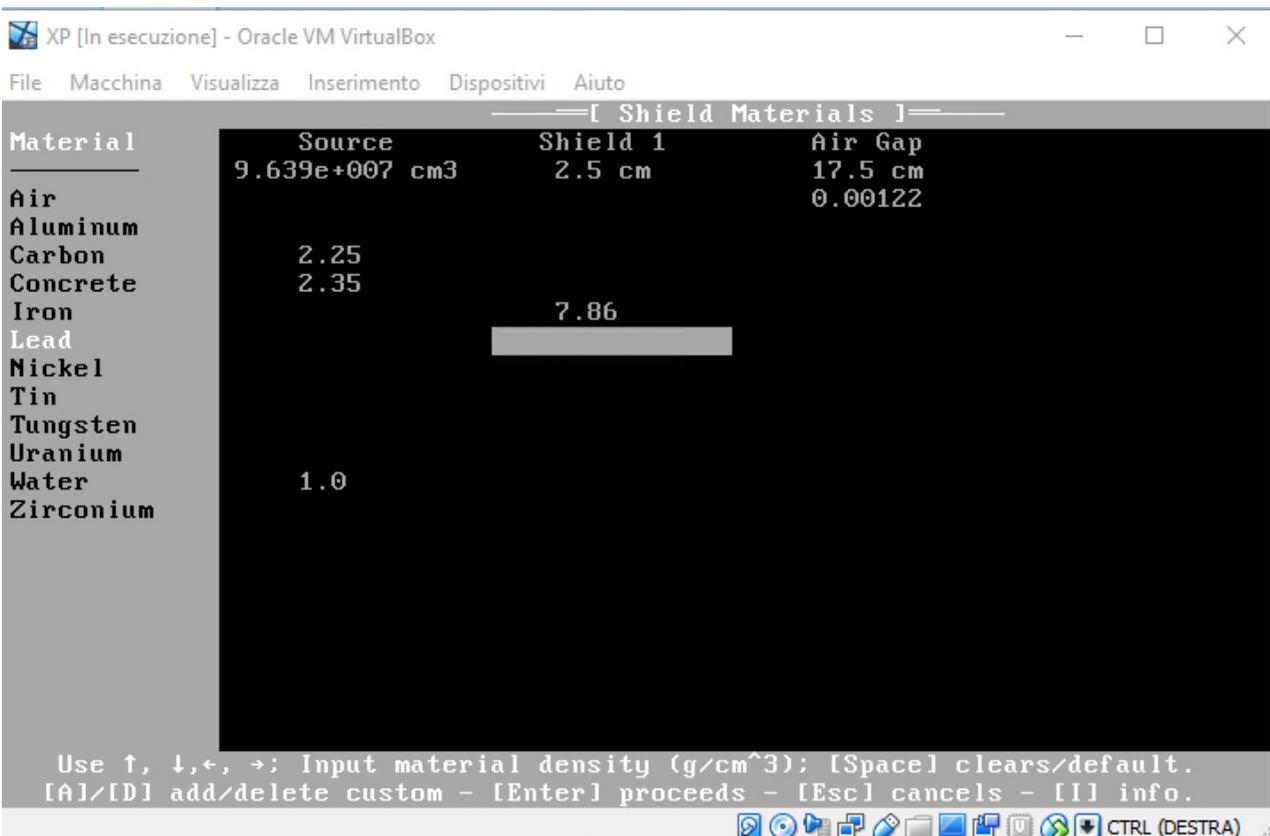


Figura 55: Caso studio configurazione uniforme pag. 3

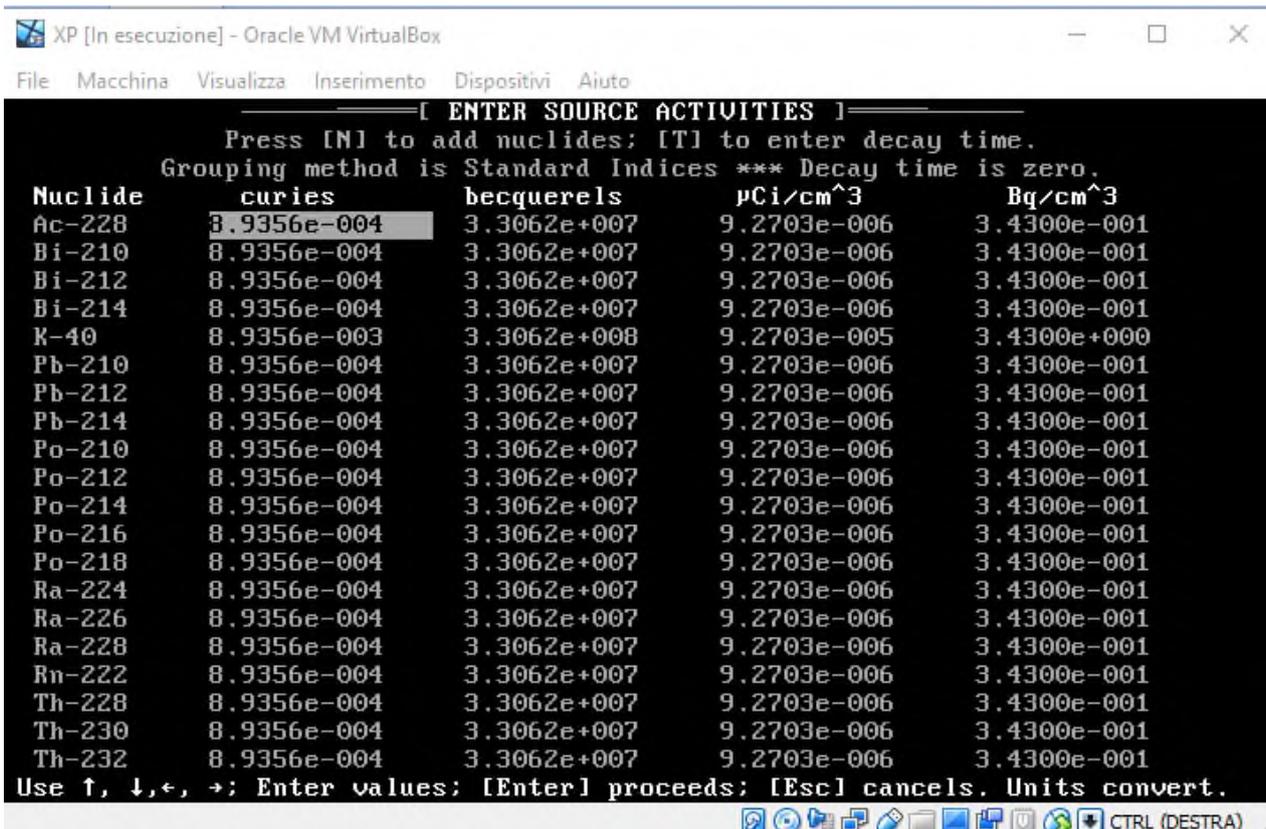


Figura 56: Caso studio configurazione uniforme pag. 4

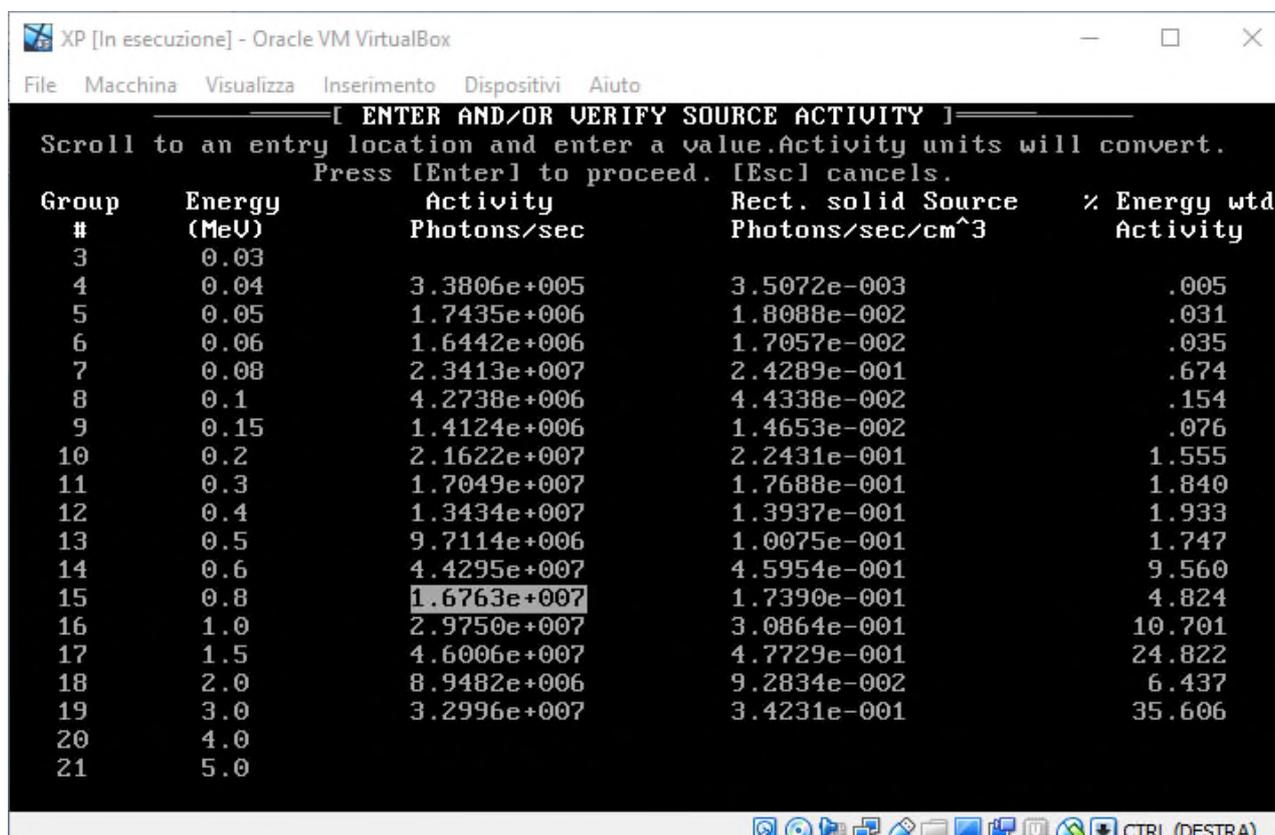


Figura 57: Caso studio configurazione uniforme pag. 5

```

XP [In esecuzione] - Oracle VM VirtualBox
File Macchina Visualizza Inserimento Dispositivi Aiuto
MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITHOUT BUILDUP
FILE: UNIFORM3.MS4
Case Title: uniforme cer 050109
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:19 a.m.
| <--- RESULTS AT THE DOSE POINT - NO BUILDUP ---> |
Group Energy Activity | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
# (MeV) photons/sec | photons/cm²/sec | MeU/cm²/sec | mR/hr |
8 .100 1.869e+006 | 5.163e-007 | 5.163e-008 | 7.899e-011 |
9 .150 6.177e+005 | 9.453e-006 | 1.418e-006 | 2.335e-009 |
10 .200 9.456e+006 | 5.258e-004 | 1.052e-004 | 1.856e-007 |
11 .300 7.456e+006 | 1.250e-003 | 3.749e-004 | 7.112e-007 |
12 .400 5.875e+006 | 1.776e-003 | 7.106e-004 | 1.384e-006 |
13 .500 4.247e+006 | 1.932e-003 | 9.662e-004 | 1.896e-006 |
14 .600 1.937e+007 | 1.205e-002 | 7.232e-003 | 1.412e-005 |
15 .800 7.331e+006 | 7.288e-003 | 5.830e-003 | 1.109e-005 |
16 1.000 1.301e+007 | 1.829e-002 | 1.829e-002 | 3.372e-005 |
17 1.500 2.012e+007 | 5.084e-002 | 7.626e-002 | 1.283e-004 |
18 2.000 3.913e+006 | 1.425e-002 | 2.850e-002 | 4.407e-005 |
19 3.000 1.443e+007 | 8.159e-002 | 2.448e-001 | 3.321e-004 |
TOTALS: 1.196e+008 | 1.898e-001 | 3.830e-001 | 5.675e-004 |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.
CTRL (DESTRA)

```

Figura 58: Caso studio configurazione uniforme pag. 6

```

XP [In esecuzione] - Oracle VM VirtualBox
File Macchina Visualizza Inserimento Dispositivi Aiuto
MicroShield 4.21 - Serial #4.21-00838
Licensed to FIAT SEPIN Centro di Radioprotezione
RESULTS WITH BUILDUP
FILE: UNIFORM3.MS4
Case Title: uniforme cer 050109
This case was run on Friday, January 1, 1999 at 9:19 a.m.
| <-- RESULTS AT THE DOSE POINT - WITH BUILDUP --> |
Group Energy Activity | Fluence Rate |Energy Fluence Rate|Exposure Rate|
# (MeV) photons/sec | photons/cm²/sec | MeU/cm²/sec | mR/hr |
8 .100 1.869e+006 | 1.391e-006 | 1.391e-007 | 2.127e-010 |
9 .150 6.177e+005 | 3.929e-005 | 5.893e-006 | 9.705e-009 |
10 .200 9.456e+006 | 2.912e-003 | 5.823e-004 | 1.028e-006 |
11 .300 7.456e+006 | 8.115e-003 | 2.435e-003 | 4.618e-006 |
12 .400 5.875e+006 | 1.143e-002 | 4.571e-003 | 8.907e-006 |
13 .500 4.247e+006 | 1.159e-002 | 5.793e-003 | 1.137e-005 |
14 .600 1.937e+007 | 6.663e-002 | 3.998e-002 | 7.803e-005 |
15 .800 7.331e+006 | 3.449e-002 | 2.759e-002 | 5.248e-005 |
16 1.000 1.301e+007 | 7.601e-002 | 7.601e-002 | 1.401e-004 |
17 1.500 2.012e+007 | 1.676e-001 | 2.514e-001 | 4.230e-004 |
18 2.000 3.913e+006 | 4.116e-002 | 8.232e-002 | 1.273e-004 |
19 3.000 1.443e+007 | 1.994e-001 | 5.981e-001 | 8.115e-004 |
TOTALS: 1.196e+008 | 6.193e-001 | 1.089e+000 | 1.658e-003 |
Use ↑, ↓, PgUp, PgDn for reading; [Enter] or [Esc] continues.
[P] prints; [F] ASCII file; [H] initializes the HP LaserJet PC character set.
CTRL (DESTRA)

```

Figura 59: Caso studio configurazione uniforme pag. 7

13 Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno collaborato alla buona riuscita di questo lavoro, in particolare un ringraziamento sentito per la guida competente va al mio relatore, il professore Massimo Zucchetti che mi è stato vicino con la sua esperienza e conoscenza; ringrazio il mio correlatore Mario De Salve per la disponibilità dimostratami.

Ringrazio inoltre il Centro di radioprotezione FCA di Torino per avermi fornito gli strumenti didattici ed informatici indispensabili per le valutazioni svolte.

Un ringraziamento particolare va alla Dottoressa Ferrero che con pazienza e spirito critico mi ha sostenuto, consigliato ed aiutato durante tutto lo svolgimento della tesi.

Infine è doveroso porre i miei più sentiti ringraziamenti alle persone che mi hanno supportato in questo importante periodo della mia vita. Ringrazio i miei colleghi Marco, Dalila, Valentina e Felice per l'aiuto ed il supporto nello studio. Ringrazio i miei amici Iva, Andrea, Giulia e Manuele per il sostegno morale e la vicinanza dimostratami.

Ringrazio Roberta che mi è sempre stata vicina aiutandomi, incoraggiandomi e confortandomi con la sua amorevole presenza.

Per ultimi, ma non meno importanti, ringrazio la mia famiglia ed in particolare i miei genitori, che mi sono stati accanto e mi hanno aiutato, sostenuto ed incoraggiato nel mio percorso di studi.

Grazie di cuore a tutti.

Andrea Carini
Torino, 18 ottobre 2018