Le grandezze dosimetriche

1. Introduzione

Per la valutazione dell'esposizione a radiazioni ionizzanti sono state sviluppate delle grandezze speciali, dette *grandezze dosimetriche*: queste si possono schematicamente suddividere in *grandezze di dose* e *grandezze radioprotezionistiche*. Le prime sono basate sulla misura dell'energia depositata dalle radiazioni nel materiale che attraversano, mentre quelle radioprotezionistiche correlano la dose di radiazione all'effettivo rischio sanitario. Infatti, il detrimento sanitario è funzione, oltre che della dose, anche dell'effetto biologico di radiazioni di diversa qualità e della diversa sensibilità degli organi e dei tessuti alla radiazione ionizzante.

Le *grandezze di dose* sono state introdotte a partire dal 1928 dall'allora Comitato Internazionale per le grandezze sui Raggi X (IXRUC poi diventato ICRU - Commissione internazionale sulle unità e sulle misure della radiazione): quella ad oggi più utilizzata è la "dose assorbita".

Le attuali *grandezze radioprotezionistiche* sono state introdotte dall'ICRP (International commission on radiological protection) nel 1977 (Pubblicazione nr. 26) e successivamente riviste, rinominate e meglio specificate sempre dall'ICRP nel 1991 (Pubblicazione nr. 60). In particolare, l'introduzione delle grandezze radioprotezionistiche "dose equivalente" e "dose efficace" ha apportato un contributo significativo alla protezione radiologica poiché ha permesso di sommare le dosi da esposizione totale e parziale del corpo dovute a diversi generi di irradiazione esterna e interna da introduzione nel corpo di radionuclidi per ingestione o inalazione (Es. radon).

La "dose equivalente" e la "dose efficace" non possono essere misurate direttamente nei tessuti del corpo; il sistema di protezione comprende perciò anche delle *grandezze operative*, che possono essere misurate e dalle quali possono essere ricavate le grandezze radioprotezionistiche.

Nelle ultime Pubblicazioni (nr. 103 del 2007 e nr. 119 del 2012) l'ICRP ha riesaminato e chiarito alcuni aspetti del sistema di dosimetria illustrato nella Pubblicazione nr. 60.

Autore: Alessandro Rossi
Ctss

2. Grandezze usate in radioprotezione[1]

La radioprotezione si occupa del controllo delle esposizioni a radiazioni ionizzanti al fine di prevenire le reazioni tissutali e limitare il rischio di effetti stocastici a livelli accettabili[2]. Per valutare le dosi da esposizioni a radiazione sono state sviluppate speciali *grandezze dosimetriche* dall'ICRP e dall' ICRU.

Le *grandezze radioprotezionistiche* fondamentali adottate dall'ICRP sono basate sulle misure dell'energia ceduta dalla radiazione agli organi ed ai tessuti del corpo umano. Queste grandezze permettono la quantificazione dell'entità dell'esposizione alla radiazione ionizzante a seguito di irradiazione sia parziale che totale del corpo per sorgenti di radiazione esterne e da incorporazione di radionuclidi all'interno del corpo. Le dosi stimate possono poi essere paragonate con i limiti di dose raccomandati per le persone esposte per ragioni lavorative e per i membri della popolazione.

2.1 Esposizione a radiazioni ionizzanti

L'esposizione di un organismo vivente alle radiazioni ionizzanti può essere:

- **acuta**, se è prodotta in un brevissimo lasso di tempo, in altre parole con elevata intensità o rateo di dose (analogamente a quanto avviene in un infortunio);
- **cronica**, se avviene in un tempo prolungato, con bassa intensità o rateo di dose. A parità di dose, l'entità dei danni può essere differente da quella dovuta all'esposizione acuta: di questo si cerca di tener conto tramite il "fattore di efficacia di dose e di rateo di dose" (DDREF);
- **esterna**, se è prodotta da sorgenti situate all'esterno dell'organismo;
- **interna**, se è prodotta da sorgenti introdotte nell'organismo, ad esempio in seguito ad ingestione o inalazione di radionuclidi;
- **globale**, se l'esposizione, considerata omogenea, si riferisce al corpo intero;
- **parziale**, se la radiazione colpisce soprattutto una parte dell'organismo o uno o più organi o tessuti, oppure se l'esposizione del corpo intero viene considerata non omogenea.

2.2 Dose assorbita

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorché si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare, il danno subito dai tessuti biologici è in diretta relazione con l'energia assorbita per unità di massa. Di questa circostanza si tiene conto per mezzo della grandezza "dose assorbita", D, definita come il rapporto tra l'energia media ceduta dalle radiazioni ionizzanti alla materia in un certo elemento di volume e la massa di materia contenuta in tale elemento di volume.

[1] Verranno citate solo le grandezze maggiormente utilizzate.

[2] Per la definizione e la descrizione degli effetti sulla salute, vedere l'approfondimento sui danni da radiazioni ionizzanti.

Nelle applicazioni pratiche, le dosi assorbite sono spesso mediate su volumi maggiori di tessuto (T); si suppone così che, per basse dosi, il valore medio di dose assorbita in uno specifico organo o tessuto possa essere correlato, con la precisione sufficiente a scopi radioprotezionistici, al detrimento dovuto agli effetti stocastici in tutte le parti di quell'organo o di quel tessuto.

L'unità di misura internazionale della dose assorbita è il Gray (Gy). Un Gray corrisponde all'assorbimento di 1 joule in 1 kg di materia (1 Gy = 1 J kg^{-1}); è possibile trovare la dose assorbita espressa in rad, unità di misura usata in precedenza (1 Gy = 100 rad).

2.3 Dose equivalente

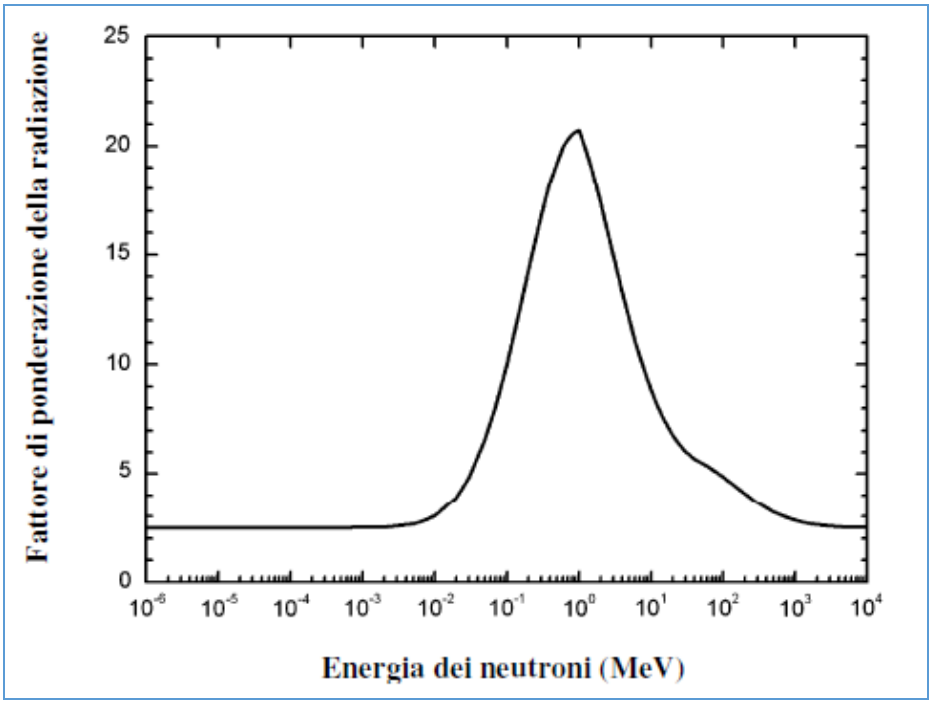
Non è sufficiente utilizzare la dose assorbita come unico termine per misurare l'esposizione in radioprotezione e per stimare il rischio associato perché gli effetti della radiazione dipendono non solo dalla dose assorbita ma anche dal tipo di radiazione, dalla distribuzione spaziale e temporale dell'energia assorbita all'interno del corpo umano e dalla radiosensibilità dei tessuti o degli organi esposti; dosi eguali impartite da tipi differenti di radiazioni producono danni biologici differenti.

Per tener conto della diversa pericolosità delle radiazioni incidenti, nel 1991 sono stati introdotti i cosiddetti fattori di ponderazione delle radiazioni, w_R. Tali valori sono stati rivisti nelle ultime pubblicazioni dell'ICRP: la nr. 103 del 2007 e la nr. 119 del 2012. Si tratta di un parametro che tiene conto della pericolosità delle varie radiazioni rispetto alla radiazione di riferimento (fotoni), cui viene assegnato per definizione un w_R uguale a 1. Il prodotto della dose assorbita media in un organo o tessuto, D_T, per il fattore w_R, prende il nome di "dose equivalente" nel tessuto o organo T, H_T ($H_T = w_R * D_T$). L'unità di misura della dose equivalente prende il nome di Sievert (Sv); la vecchia unità era il rem (1 Sv=100 rem).

Tabella n. 1	Fattori di ponderazione delle radiazioni		
Radiazione	**Energia**	**w_R**	
		d.lgs. 101/2020	**ICRP 103:2007, 119:2012**
Fotoni	tutte le energie	1	1
Elettroni e muoni	tutte le energie	1	1
Protoni (escluso rinculo)	>2 MeV	5	2
Alfa Frammenti di fissione Nuclei pesanti	tutte le energie	20	20
Neutroni	< 1MeV	$2.5+18.2\ e^{-[\ln(En)]2/6}$	Stesse formule Curva continua in funzione dell'energia dei neutroni illustrata in figura 1
	1 – 50 MeV	$5{,}0+17{,}0\ e^{-[\ln(2En)]2/6}$	
	> 50 MeV	$2.5+3.25\ e^{-[\ln(0.04En)]2/6}$	

Come si può osservare dalla precedente tabella 1 e dal grafico che segue, alla dose assorbita di 1 Gy può corrispondere una dose equivalente da 1 a 20 Sv, in funzione della pericolosità del tipo di radiazione incidente.

Figura n. 1	Fattore di ponderazione della radiazione, w_R, per i neutroni in funzione della loro energia



2.4 Dose efficace

Per tener conto della diversa radiosensibilità dei diversi organi e tessuti del corpo umano per gli effetti stocastici, è stata introdotta la grandezza "dose efficace", E; questa è definita come la somma delle dosi equivalenti medie nei diversi organi e tessuti, H_T, ciascuna moltiplicata per un fattore di ponderazione, w_T, che tiene appunto conto della diversa radiosensibilità degli organi e tessuti irraggiati.

Nella tabella 2 sono elencati i valori dei fattori di ponderazione per la radiosensibilità dei vari organi assunti nel d.lgs. 101/2020 per i w_T suggeriti dall'ICRP nella pubblicazione nr. 103 del 2007.

Tabella n. 2	Fattore di ponderazione per la radiosensibilità dei vari organi

ORGANO	w_T d.lgs. 101/2020 ICRP 103:2007
Gonadi	0,08
Midollo osseo rosso Colon Polmone Stomaco Seno Rimanenti tessuti (ghiandole surrenali, regione extratoracica, cistifellea, cuore, reni, linfonodi, muscolo, mucosa orale, pancreas, prostata, intestino tenue, milza, timo, utero)	0,12
Vescica Fegato Esofago Tiroide	0,04
Superficie dell'osso Cervello Ghiandole salivari Pelle	0,01

La dose efficace, come la dose equivalente, si esprime in Sievert; anche in questo caso, a parità di dose equivalente, può assumere valori sensibilmente differenti; per esempio confrontando l'irradiazione delle gonadi con quella della vescica, la dose efficace sarà nella prima situazione 2 volte più elevata che nella seconda.

Quando si verifica un'introduzione di radionuclidi nel corpo umano (contaminazione interna), si deve tener conto che l'irraggiamento si protrarrà fin quando il radionuclide introdotto è presente nel corpo. La dose equivalente ricevuta da un certo organo o tessuto in tale periodo prende il nome di "dose equivalente impegnata". Allo stesso modo, la dose efficace ricevuta in quel periodo prende il nome di "dose efficace impegnata". Nel caso dei lavoratori il calcolo delle dosi impegnate viene effettuato cautelativamente su un periodo di 50 anni a partire dall'introduzione.

3. Le grandezze operative

Le grandezze operative sono volte a fornire una stima o un limite superiore per il valore delle grandezze radioprotezionistiche relative ad una esposizione, o ad una esposizione potenziale, delle persone nella maggior parte delle condizioni d'irradiazione; in altre parole, la relazione tra le grandezze operative e le grandezze di protezione deve essere ragionevolmente conservativa ($H_{prot}/H_{op} \leq 1$).

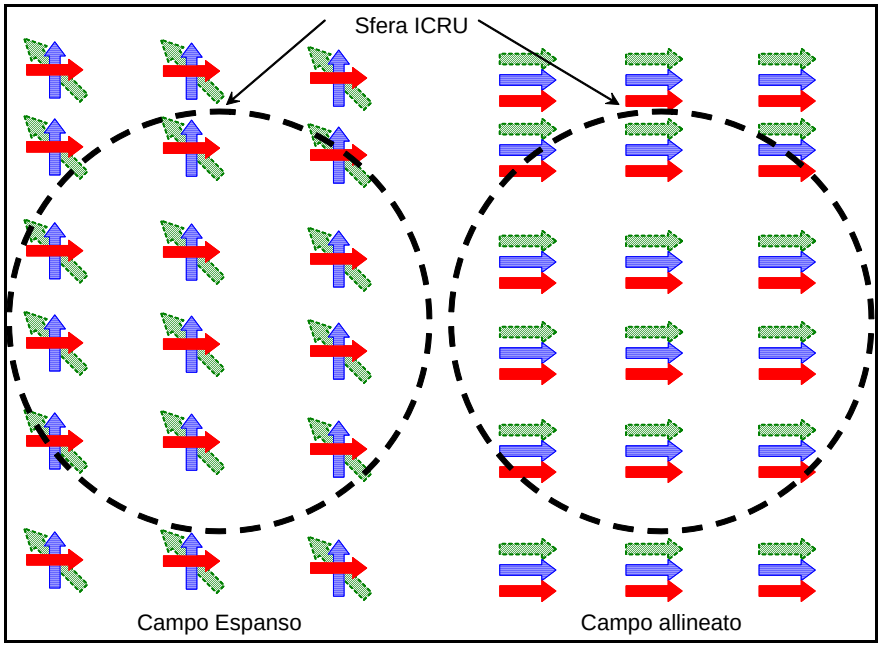
Come mostrato nello schema che segue, per il sistema di protezione radiologica per le esposizioni interne ed esterne sono utilizzati diversi tipi di grandezze operative. Nello specifico, per il monitoraggio delle esposizioni esterne, le grandezze dosimetriche operative sono state definite da ICRU (ICRU, 1985; ICRU 1988), mentre per la dosimetria interna non sono state definite grandezze dosimetriche operative che determinino direttamente una valutazione della dose equivalente o efficace. Per la valutazione della dose equivalente o efficace prodotte dai radionuclidi presenti nel corpo umano, si utilizzano diversi metodi che sono essenzialmente basati su una serie di misure di attività e sull'impiego di modelli biocinetici.

Per tutti i tipi di irradiazione esterna, le grandezze operative per il monitoraggio ambientale sono definite sulla base di un valore di equivalente di dose in un punto di un "fantoccio semplice" (cioè la "sfera ICRU", sfera del diametro 30 centimetri costituita da materiale equivalente al tessuto umano). Tali grandezze dovrebbero conservare il loro carattere di quantità puntuali e la proprietà di additività; a tale fine per l'irradiazione è stato stabilito di considerare sempre un campo di riferimento *espanso* e *allineato*.

Un campo di radiazioni espanso è un ipotetico campo di radiazioni nel quale la fluenza spettrale e angolare ha lo stesso valore in tutti i punti di un volume sufficientemente grande, uguale al valore nel campo reale nel punto d'interesse; in questa situazione l'intera sfera ICRU si può pensare come esposta ad un campo di radiazioni omogeneo, con la stessa fluenza, distribuzione energetica e direzionale che si ha nel punto d'interesse nel campo di radiazioni reale.

Se tutte le radiazioni sono allineate nel campo di radiazioni espanso, in modo da essere opposte ad un vettore radiale Ω, definito nella sfera ICRU, si ottiene il campo di radiazioni *allineato ed espanso*. In questo campo ipotetico di radiazioni, la sfera ICRU è irradiata in modo omogeneo da una direzione. Si dimostra che nel campo di radiazioni espanso ed unidirezionale, il valore di equivalente di dose in un punto qualunque nella sfera ICRU è indipendente dalla distribuzione di direzione delle radiazioni nel campo di radiazioni reale.

Figura n. 2	Schema esempio di Campo allineato ed espanso



Le grandezze operative introdotte dall'ICRU e recepite nella normativa nazionale (d.lgs. 101/2020) sono riportate di seguito[3].

Equivalente di dose ambientale H(d)*

Per il monitoraggio ambientale, la grandezza operativa per la valutazione della dose efficace è l'"equivalente di dose ambientale", H*(d); tale grandezza viene così definita:

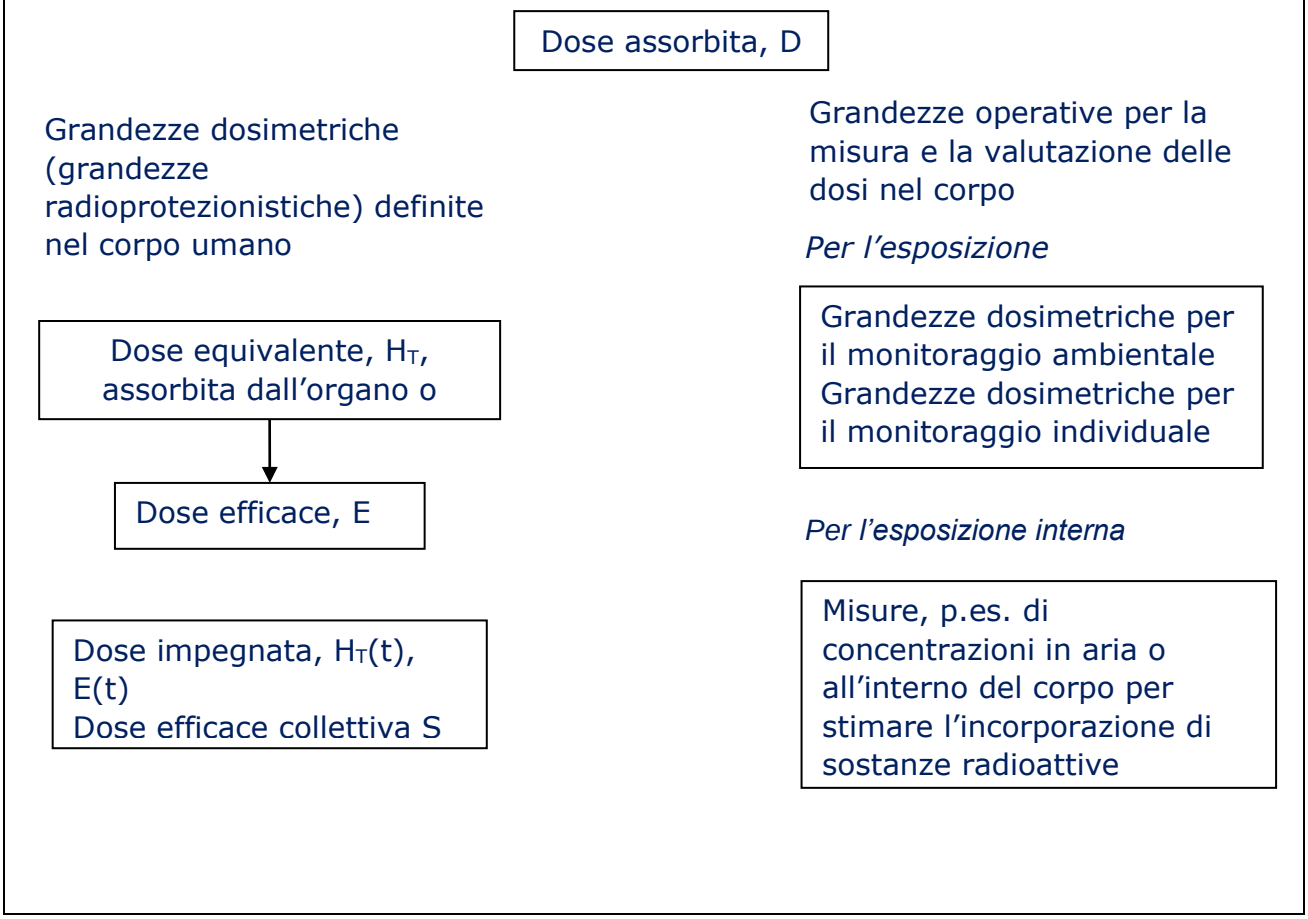
"*in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso e unidirezionale nella sfera ICRU a una profondità d, sul raggio opposto alla direzione del campo unidirezionale; l'unità di misura dell'equivalente di dose ambientale è il sievert* ".

L'ICRP raccomanda due valori per d:

- per radiazione penetrante d=10 mm e quindi H*(10);
- per radiazione debolmente penetrante d=0.07 mm e quindi H*(0.07).

[3] Le definizioni delle grandezze operative risultano assai singolari, ma bisogna sempre tenere a mente che, da un punto di vista pratico, queste altro non sono che procedure di taratura della strumentazione che verrà poi effettivamente utilizzata per la misura delle grandezze radioprotezionistiche.

Figura n. 3	Il sistema di protezione radiologica e le grandezze operative in radioprotezione



Equivalente di dose direzionale H'(d,Ω)

La grandezza operativa per il monitoraggio ambientale di radiazioni poco penetranti è l'"equivalente di dose direzionale", H'(d, **Ω**) secondo la seguente definizione:

"*equivalente di dose in un punto di un campo di radiazioni che sarebbe prodotto dal corrispondente campo espanso, nella sfera ICRU, a una profondità d, su un raggio in una determinata direzione; l'unità di misura dell'equivalente di dose direzionale è il sievert* ".

Per le radiazioni poco penetranti si sceglie d=0,07 mm e quindi H'(d, Ω) viene scritto H'(0.07, Ω).

Nella pratica, in radioprotezione, spesso la direzione Ω non è precisata, perché ad essere importante è principalmente il valore massimo di *H'* (0,07, Ω) nel punto d'interesse. Tale valore è di solito ottenuto ruotando il dosimetro durante le misure, fino a trovare la massima lettura.

Equivalente di dose personale $H_p(d)$

È definito nel tessuto molle, ad una profondità appropriata d, al di sotto di un determinato punto del corpo; l'unità di misura dell'"equivalente di dose personale" è il

sievert. Per la valutazione della dose efficace, è raccomandata una profondità d = 10 mm, e per la valutazione della dose equivalente alla cute, alle mani e ai piedi, la profondità raccomandata è d = 0,07 mm. Nei casi speciali di monitoraggio della dose equivalente al cristallino, è stata proposta come adeguata una profondità d = 3 mm.

La grandezza in esame, a causa della diffusione (*scattering*) e dell'interazione della radiazione nel corpo, può variare da individuo a individuo oltre che con la posizione del dosimetro; con riferimento all'irraggiamento al corpo intero, l'attuale normativa non specifica la posizione del punto ove determinare l'equivalente di dose, con la conseguenza che la grandezza in parola può assumere più di un valore per lo stesso individuo oltre che a variare da individuo a individuo (*multi valued quantity*).

Il monitoraggio individuale dell'esposizione esterna è di solito eseguito per mezzo di dosimetri personali portati sul corpo e la grandezza operativa definita per questo tipo di impiego tiene conto di questa situazione. Il valore vero della grandezza operativa è determinato dalle condizioni di irradiazione in prossimità del punto dove è portato il dosimetro; per una posizione del dosimetro sulla parte anteriore del tronco, la grandezza $H_p(10)$ fornisce essenzialmente una stima conservativa di *E,* anche nei casi di incidenza laterale o isotropa delle radiazioni sul corpo. Nel caso di esposizione unicamente dalla direzione posteriore, tuttavia, un dosimetro portato sulla parte anteriore del corpo è in grado di misurare correttamente l'$H_p(10)$, ma non potrà fornire una misura adeguata di *E.*

Inoltre, nei casi di esposizione parziale del corpo, la lettura di un dosimetro personale potrebbe non fornire un valore rappresentativo per la valutazione della dose efficace.

Bibliografia

- CONIGLIO A., D'ARIENZO M., SANDRI S., 2005. "*Classificazione delle radiazioni ionizzanti grandezze ed unità di misura*", ACTA I° corso "*Aggiornamenti su radiazioni ionizzanti e tutela sanitaria*" edito da I.S.R.A;
- MANCINI E. (a cura di), 2002. Appunti di Radioprotezione delle lezioni del Prof. Carlo Mancini, ed. Università di Roma "La Sapienza";
- PINTO I., 2006. Dispense del corso di radioprotezione;
- Decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117" (Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale„ n. 201 del 12 agosto 2020);
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1;

- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21;
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37;
- Annals of the ICRP. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Volume 41 Supplement 1 2012;
- ICRU Report No. 39, 1985. Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources;
- ICRU Report No. 43, 1988. Determination of Dose Equivalents from External Radiation Sources--Part II.

Data di chiusura del documento

Novembre 2023

Conoscere il rischio

Nella sezione Conoscere il rischio del portale Inail, la Consulenza tecnica per la salute e la sicurezza (Ctss) mette a disposizione prodotti e approfondimenti normativi e tecnici sul rischio professionale, come primo passo per la prevenzione di infortuni e malattie professionali e la protezione dei lavoratori. La Ctss è la struttura tecnica dell'Inail dedicata alla valutazione del rischio professionale e alla promozione di interventi di sostegno ad aziende e lavoratori in materia di prevenzione e reinserimento lavorativo.

Per informazioni

ctss@inail.it