



Schermaggio delle radiazioni

Dott.ssa Alessandra Bernardini

Barriere protettive

- Le barriere protettive servono a ridurre la dose da radiazione al valore desiderato.
- Nella progettazione delle schermature devono essere presi in considerazione diversi fattori:
 - Modalità d'uso della macchina radiogena (grafia, scopia)
 - Tempo di utilizzo (carico di lavoro misurato in mAmin/sett)
 - Direzione del fascio
 - Energia del fascio
 - Ambienti circostanti

Attenuazione della radiazione

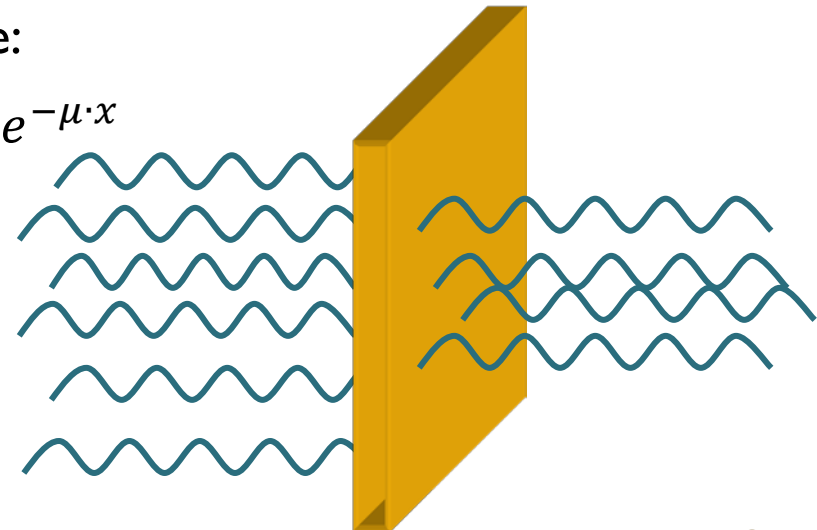
- Dato un fascio di fotoni monocromatici che attraversa uno spessore dx , la frazione dN di fotoni assorbiti sarà:

$$dN = -\mu N \cdot dx$$

- Dove μ è la probabilità che il singolo fotone interagisca con il mezzo e sia rimosso dal fascio iniziale.
- Integrando i due termini si ottiene la variazione del numero di fotoni in funzione dello spessore di materiale:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^x \mu \cdot dx \Rightarrow N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

- Il numero di fotoni del fascio iniziale è degradato esponenzialmente.



Coefficiente di attenuazione

- Il coefficiente di attenuazione μ dipende dall'energia del fotone incidente e dal tipo di materiale attraversato.
- Può essere espresso in funzione della sezione d'urto di interazione, tenendo conto della densità del mezzo:

$$\mu = \rho \cdot \frac{N_a}{A} \cdot \sigma$$

Dove:

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_c + \sigma_{pp}$$

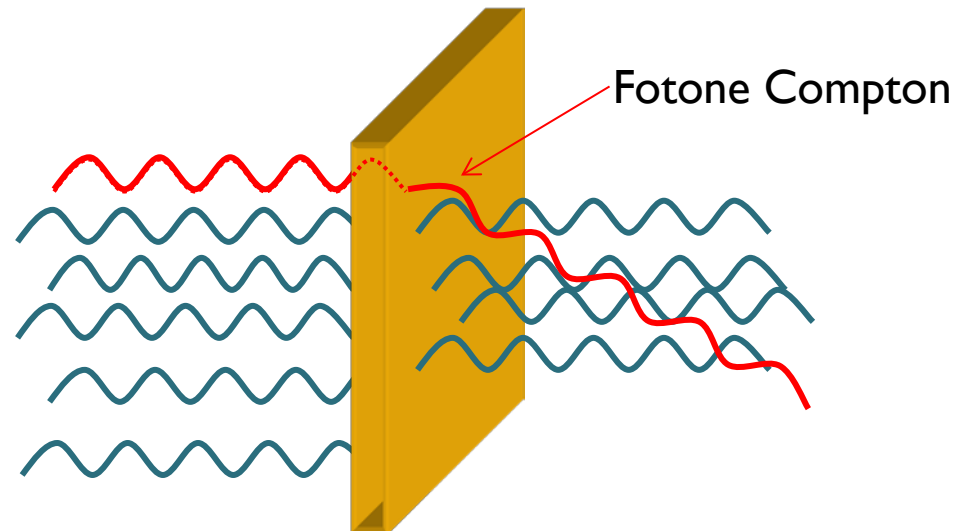
σ_f = sez. d'urto per assorbimento fotoelettrico.

σ_c = sez. d'urto per interazione Compton.

σ_{pp} = sez. d'urto per produzione di coppie.

Geometrie di irraggiamento

- L'attenuazione esponenziale del fascio è una assunzione valida solo in condizioni in cui siano predominanti effetto fotoelettrico o creazioni di coppie.
- Se il fascio, nell'attraversare uno spessore, subisce anche interazione Compton allora viene degradato in energia ma non in intensità.



Build up

- Per tener conto della radiazione diffusa, ma non assorbita, dal materiale bisogna aggiungere il fattore di build-up all'espressione dell'attenuazione del fascio:

$$N(x) = B(E, x) \cdot N_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

- Il fattore di build-up è definito come:

$$B(E, x) = \frac{\textit{fotoni imperturbati} + \textit{fotoni Compton}}{\textit{fotoni imperturbati}}$$

- Se applichiamo la formula esponenziale semplice, senza il fattore di build-up stiamo sottostimando il numero di fotoni nel fascio emergente.
- Se consideriamo tutti i fotoni diffusi per effetto Compton stiamo sovrastimando il fascio emergente perché non tutti i fotoni diffusi superano la schermatura.

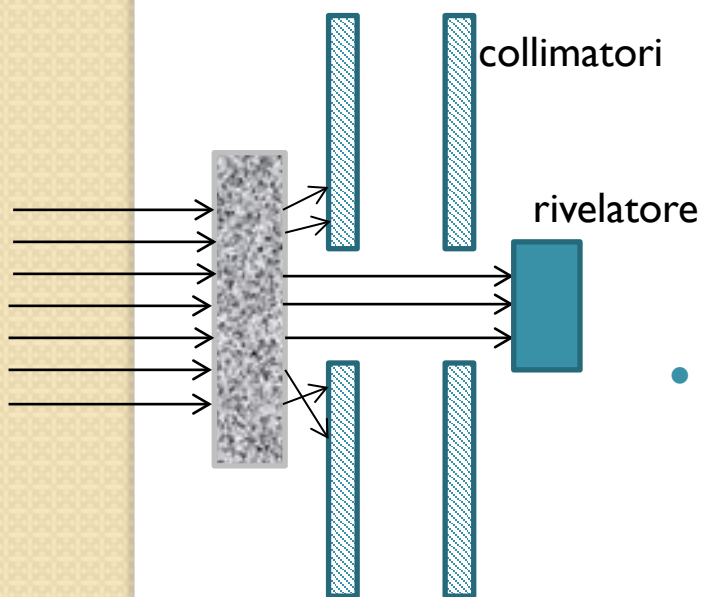
Condizioni di «buona geometria»

- Se il fascio è molto stretto (narrow beam) o altamente collimato, si riesce ad eliminare quasi totalmente i fotoni Compton dal fascio in ingresso al rivelatore.

$$B(E, x) = 1 + \frac{\text{fotoni Compton}}{\text{fotoni imperturbati}}$$

$$B(E, x) \approx 1 \quad (\text{in condizioni di } \underline{\text{buona}} \text{ geometria})$$

$$B(E, x) > 1 \quad (\text{in condizioni di } \underline{\text{cattiva}} \text{ geometria})$$



- Il fattore di build-up dipende da:
 - ✓ Energia e direzione di propagazione del fascio
 - ✓ Profondità di penetrazione della radiazione nel mezzo
 - ✓ Coefficiente di attenuazione del mezzo
 - ✓ Geometria mezzo attenuatore – rivelatore
 - ✓ Funzione di risposta del rivelatore
- Il calcolo dei fattori di build-up non è banale e viene fatto attraverso formule empiriche o con simulazioni Monte Carlo

Limiti di dose

- I limiti di dose per la popolazione e per i lavoratori vengono indicati nel D.Lgv. 230/1995 e succ. mod. int. e in particolare agli artt. 82 e 96 che richiamano gli allegati III e IV del D.Lgv. 240/2000.
- Ricordiamo i limiti superiore di dose per le persone del pubblico e per la popolazione, di cui bisogna tener conto quando si progettano delle barriere:

Categoria	Limite (mSv/anno)
Pubblico	1
Lavoratori esposti cat. B	6
Lavoratori esposti cat. A	20

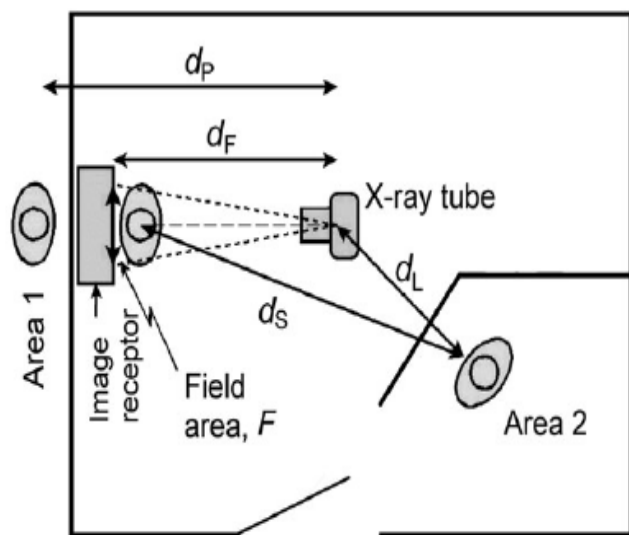
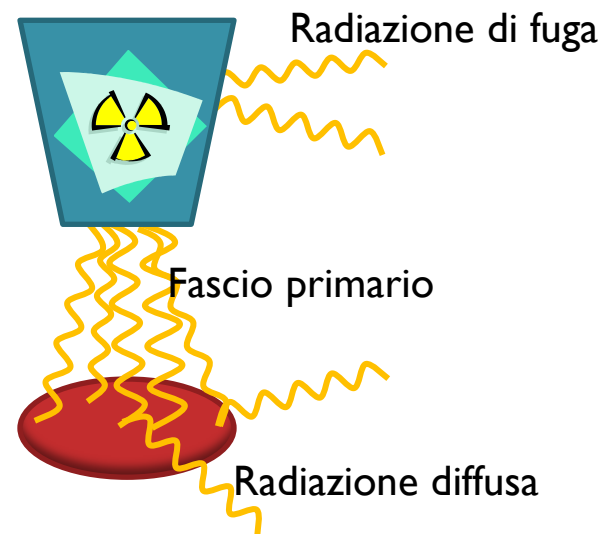
- In questi limiti sono da considerare anche le dosi prese per eventi anomali prevedibili o malfunzionamenti.

Norme di buona tecnica

- Per il calcolo delle barriere la normativa rimanda a «norme di buona tecnica» non meglio specificate.
- I principali organismi nazionali e internazionali che emanano norme tecniche per la protezione dalle radiazioni ionizzanti sono:
 - CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)
 - UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)
- Questi organismi sono associati ad organismi internazionali quali:
 - IEC (International Electrotechnical Commission)
 - ISO (International Organization for Standardization)
- Attualmente per la valutazioni delle schermature attorno alle macchine radiogene vengono utilizzate le pubblicazioni NCRP n.49 e n.51 aggiornate dalla n.144 e n.147.
- Altre pubblicazioni di riferimento sono quelle della IAEA (International Atomic Energy Agency) e dell'ICRP (International Commission on Radiological Protection).

Fascio primario e componente diffusa e di fuga

- A seconda che si voglia schermare il fascio primario o le componenti secondarie di fuga e di radiazione diffusa, si utilizzano formule diverse.
- Il fascio primario rappresenta la fonte di rischio maggiore del tubo a RX.



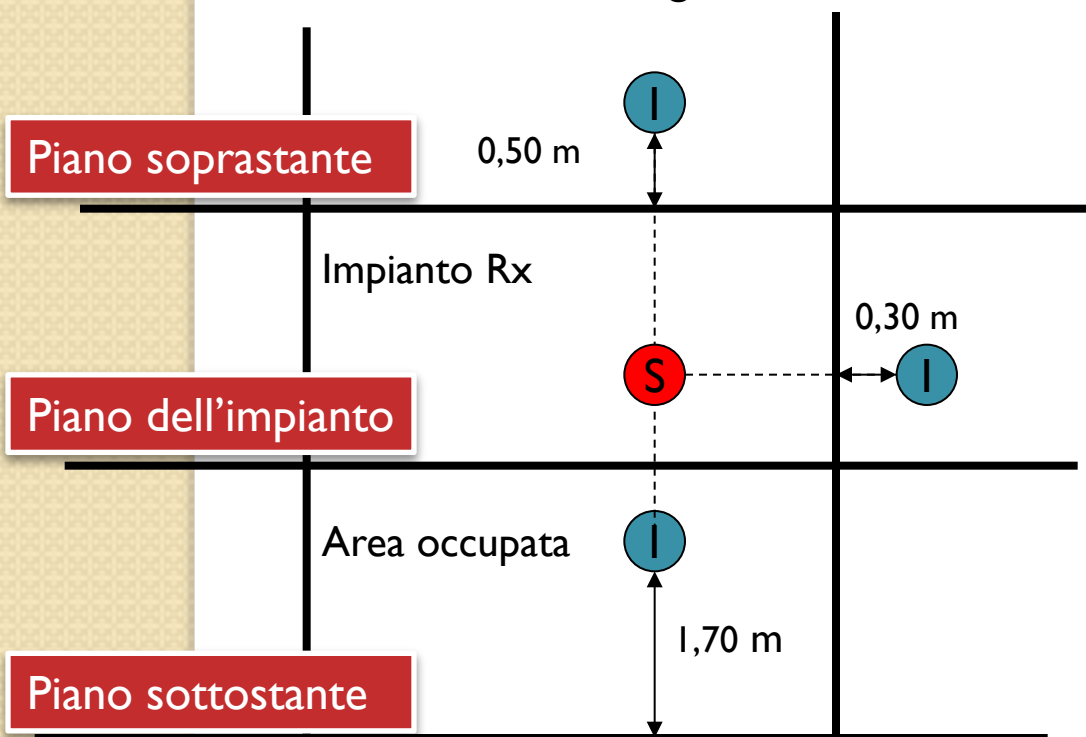
- Area 1: schermatura dal fascio primario
- Area 2: schermatura dal fascio diffuso e di fuga
 - d_p : distanza fuoco-area 1
 - d_F : distanza fuoco- image receptor (il fascio primario ha area F)
 - d_s : distanza diffusore-area 2 (radiazione diffusa)
 - d_L : distanza cuffia-area 2 (leakage)

Punti di calcolo delle barriere

- Obiettivi di progetto:
 - Area controllata: 0,4 mGy/settimana*
 - Area non controllata: 0,02 mGy/settimana

*le norme italiane sono più restrittive delle indicazioni europee

Distanza dalla sorgente



I: Punto di calcolo per aree occupate

- Si considera la distanza della sorgente dagli organi sensibili della persona

Barriere primarie

- Per calcolare lo spessore delle barriere è necessario prima individuare il punto P di interesse.
- A questo punto si calcola il KERMA in aria alla distanza d_p in assenza di schermatura:

$$K_p(0) = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot N}{d_p^2}$$

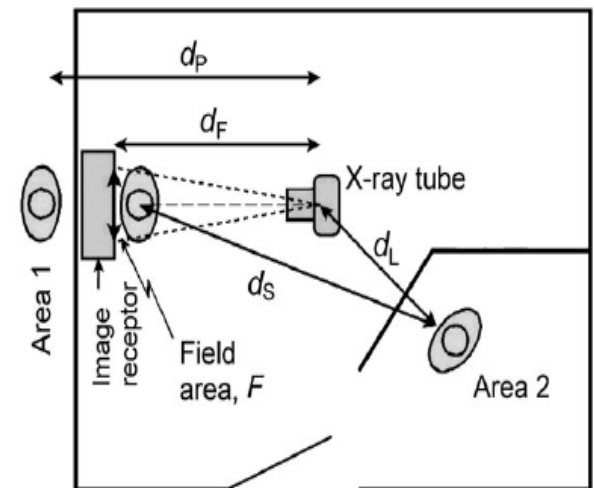
$K_p(0)$: kerma in aria nel punto P in assenza di schermatura

K_p^1 : kerma in aria sul fascio primario a 1 m dal fuoco

U : fattore d'uso

N : numero di pazienti / settimana

d_p : distanza fuoco-punto di interesse



Calcolo della schermatura

- Fissato il kerma in aria di progetto nel punto di interesse e conoscendo il kerma in assenza di barriera nello stesso punto, si calcola il fattore di trasmissione $B(x)$:

$$B(x) = \frac{K(x)}{K(0)} = \frac{\frac{P}{T}}{\frac{K^1 \cdot U \cdot N}{d^2}} \qquad B(x) = \frac{P}{T} \cdot \frac{d^2}{K^1 \cdot U \cdot N}$$

B(x): fattore di trasmissione (è dato dal rapporto fra il kerma in aria dietro la barriera di spessore x e il kerma in aria nello stesso punto senza barriera)

d : distanza del punto di interesse dalla sorgente

K¹ : kerma in aria medio a 1 m dalla sorgente in assenza di schermatura

N : numero di pazienti esaminati per settimana nella sala radiografica

P : dose di progetto nel punto di interesse (kerma in aria) in mGy/settimana

U : fattore d'uso del fascio nella direzione della parete primaria considerata

T : fattore d'occupazione dell'area di interesse

Calcolo di K_p^1 (fascio primario)

- Per il fascio primario il valore di K^1 viene fornito in mGy/mAmin a 1m dal fuoco del tubo RX in funzione alla tensione applicata (kVp).
- Il valore di K^1 si ricava dai grafici e viene chiamato K_w^1 (perché viene fornito per unità di carico di lavoro) e dipende:
 - dalla forma d'onda del generatore;
 - dal materiale dell'anodo;
 - dalla filtrazione del fascio;
 - dall'angolazione dell'anodo
- Il grafico B.1 fornisce i valori di K_w^1 :
 - per un **mammografo** con anodo al Mo e filtrazione al Mo;
 - per un **generatore trifase** -12 impulsi con anodo al W e filtro di Al

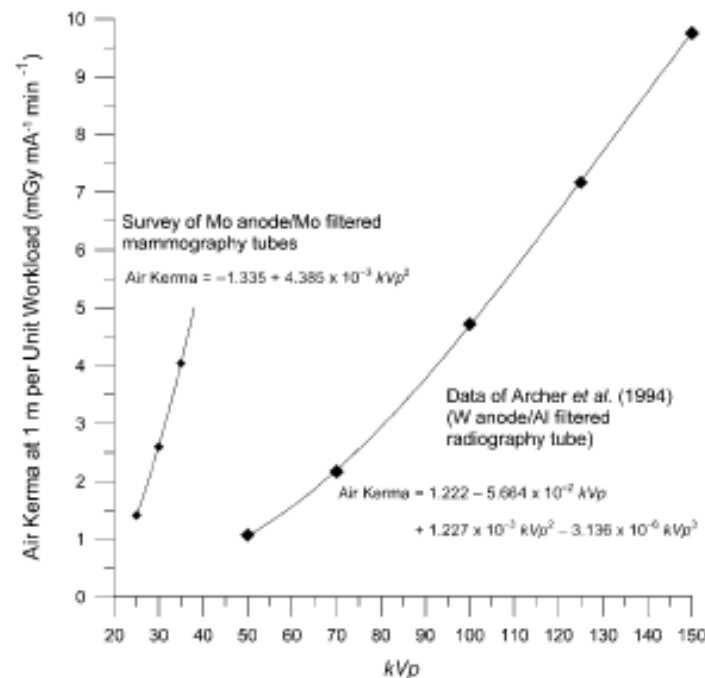


Fig. B.1. The primary beam air kerma per unit workload at 1 m [K_w^1 (kVp)].

Grafico e valori

- I valori di K^1_w in $mGy/mAmin$ per unità di carico di lavoro (W) possono ricavarsi dalle formule polinomiali:

- Mammografo Mo/Mo:

$$K^1_w = -1,335 + 4,385 \cdot 10^{-3} kVp^2$$

- Generatore trifase -12 impulsi Tungsteno/alluminio:

$$K^1_w = 1,222 - 1,664 \cdot 10^{-2} kVp + 1,227 \cdot 10^{-3} kVp^2 - 3,136 \cdot 10^{-6} kVp^3$$

- Il valore K^1_p ($mGy/paziente$) per il carico effettivo viene quindi calcolato con la seguente formula:

$$K^1_p(kVp) = K^1_w(kVp) \cdot W_{pz}$$

Dove:

$K^1_w(kVp)$: $mGy/mAmin$ a 1 m per i kV_p applicati

W_{pz} : $mAmin/paziente$

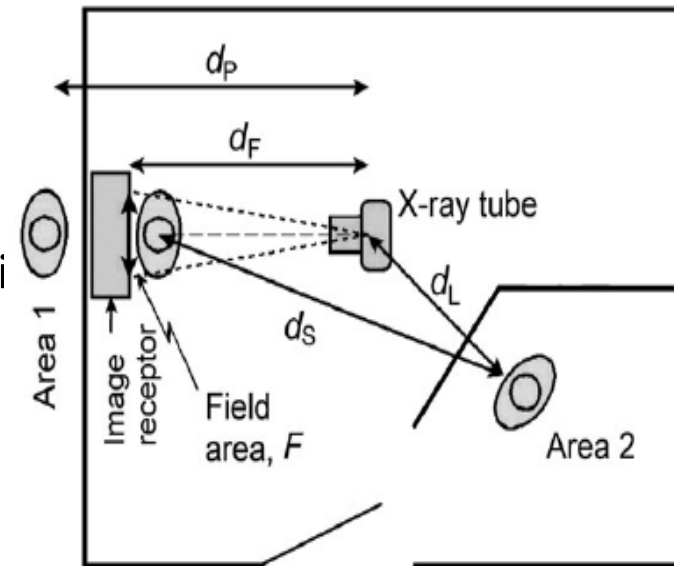
Calcolo del fattore di trasmissione

- Il coefficiente di trasmissione $B(X)$ può essere calcolato conoscendo il valore di K_p^1 nel punto di interesse.
- Con il coefficiente di trasmissione, attraverso i grafici si può ricavare lo spessore della barriera nel materiale scelto.

$$B(x) = \frac{P}{T} \cdot \frac{d_p^2}{K_p^1 \cdot U \cdot N}$$

Preshielding

- Il corpo del paziente e il ricettore d'immagine (compreso il supporto) attenuano in modo consistente il fascio. Questa viene definita pre-schermatura (preshielding).
- Principio cautelativo:** poiché non sempre il fascio primario viene totalmente intercettato dal paziente, cautelativamente si ignora tale attenuazione e si considera solo quella dovuta al ricettore d'immagine (cassetta, griglia, tavolo) e ai suoi supporti.



Elementi attenuanti	x_{pre} (mm)		
	Piombo	Cemento	Acciaio
Griglia, cassetta e supporto	0,85	72	7
Solo griglia e cassetta	0,30	30	2

Lo spessore equivalente di attenuazione x_{pre} potrà essere sottratto dallo spessore totale della barriera primaria:

$$x_{barr} = x_{calc} - x_{pre}$$

Metodi di calcolo della schermatura

- Lo spessore della schermatura si calcola attraverso la formula di Archer:

$$x = \frac{1}{\alpha \cdot \gamma} \ln \frac{\left(\frac{1}{B(x)} \right)^{\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}}$$

Dove α , β e γ sono tabulati nella NCRP n.147:

- In appendice A, tabella A.1  in **funzione dei kVp** e del materiale schermante
Tabella A.1
- In appendice B, tabella B.1  in **funzione della tipologia di sala** e del m. s.
Tabella B.1

- Oppure, conoscendo il fattore di trasmissione, si ricava lo spessore direttamente dai grafici di attenuazione forniti per diversi materiali.

Parametri della formula di Ascher

- I parametri di interpolazione α , β , γ per la **radiazione primaria** si ricavano dalla **tabella A.I** dell'appendice A
 - (in **funzione dei kVp** e del materiale schermante)
- oppure dalla **tabella B.I** dell'appendice B
 - (in **funzione della tipologia di sala** e del materiale schermante)
- leggendo direttamente lo spessore occorrente dai **grafici $x = f(B)$** nell'appendice B per diversi materiali schermanti

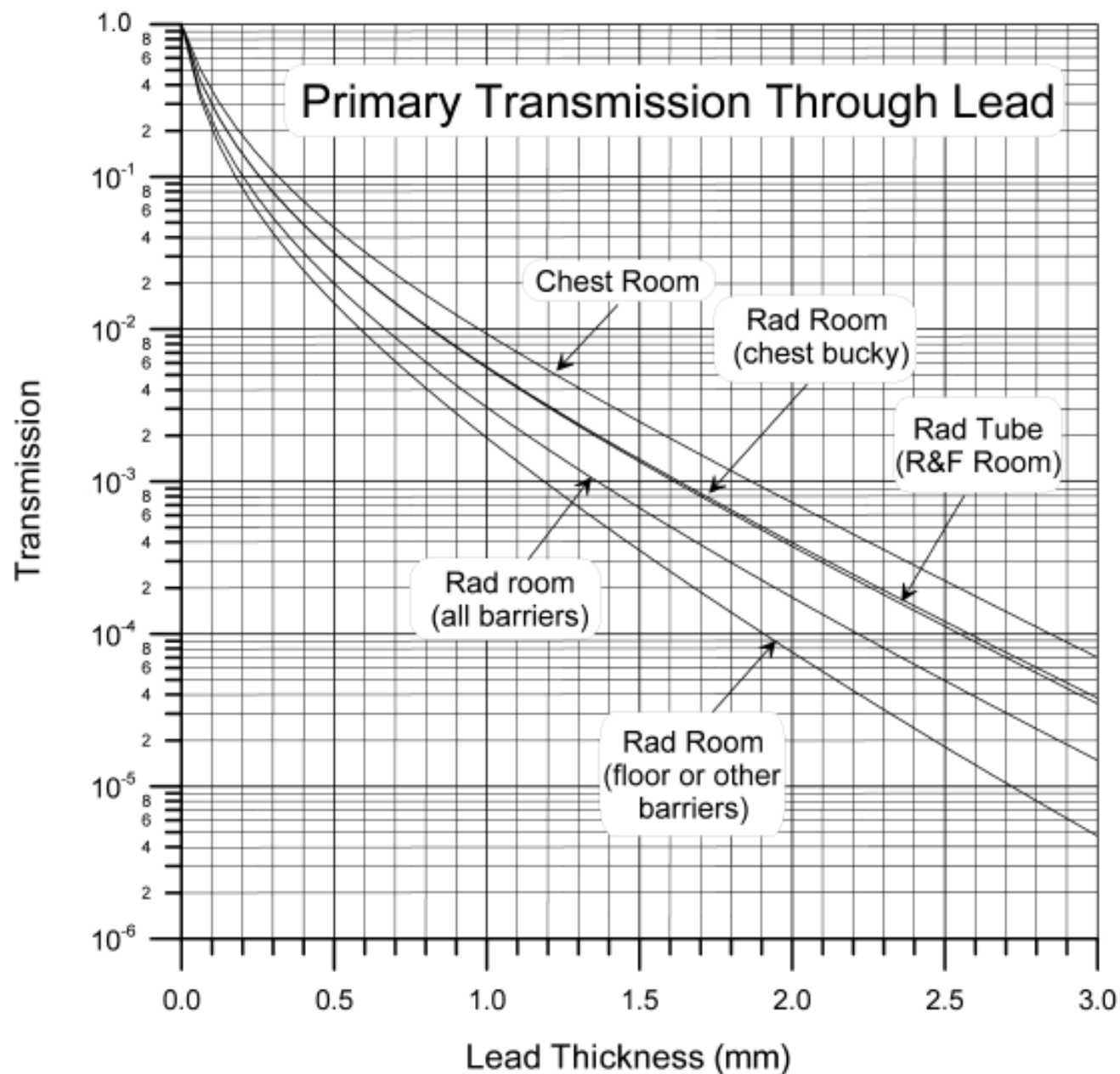


Fig. B.2. Primary broad-beam transmission through lead calculated for the clinical workload distributions in Table 4.2.

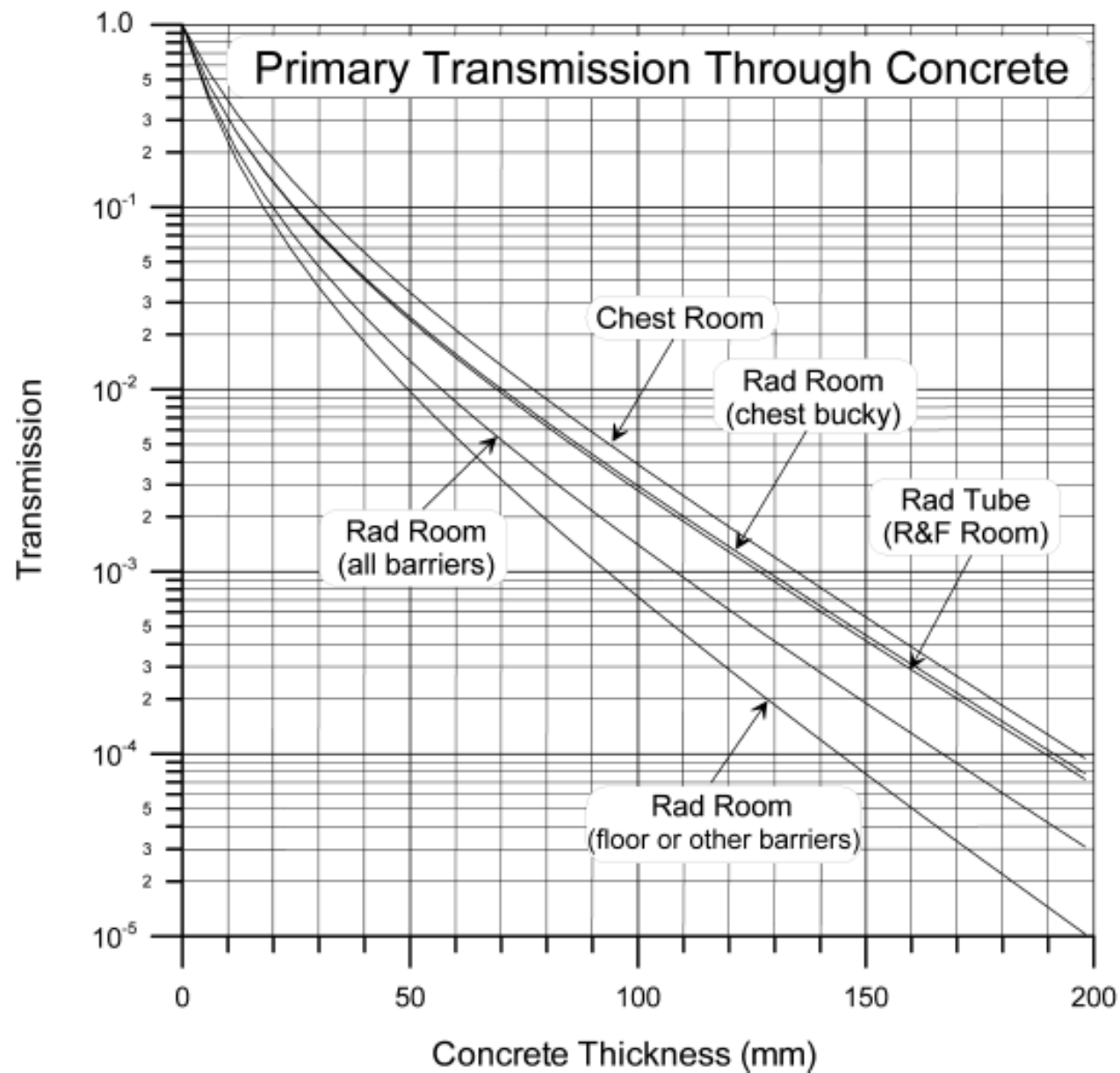


Fig. B.3. Primary broad-beam transmission through concrete calculated for the clinical workload distributions in Table 4.2.

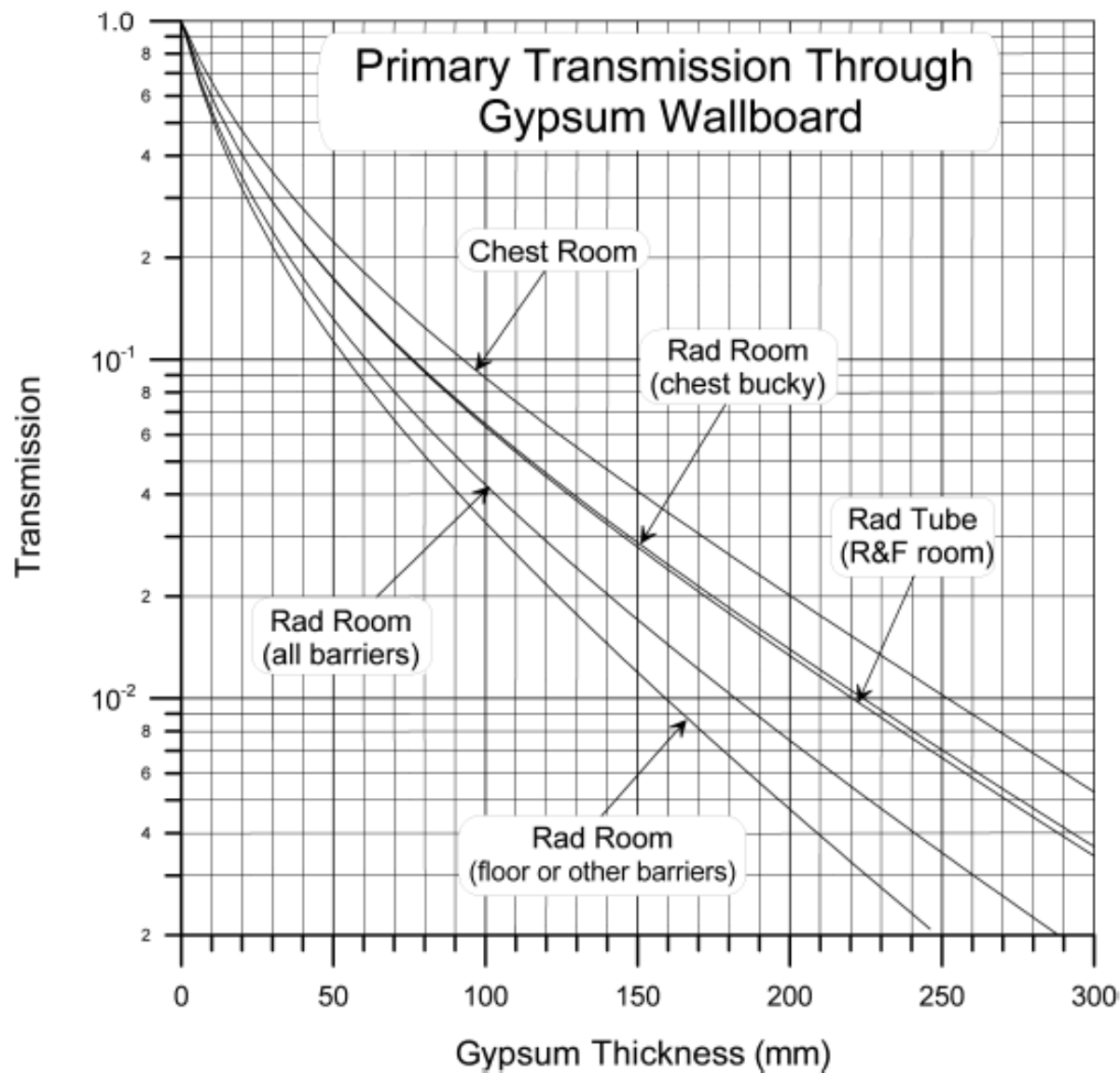


Fig. B.4. Primary broad-beam transmission through gypsum calculated for the clinical workload distributions in Table 4.2. A nominal 5/8 inch sheet of "Type X" gypsum wallboard has a minimum gypsum thickness of ~14 mm.

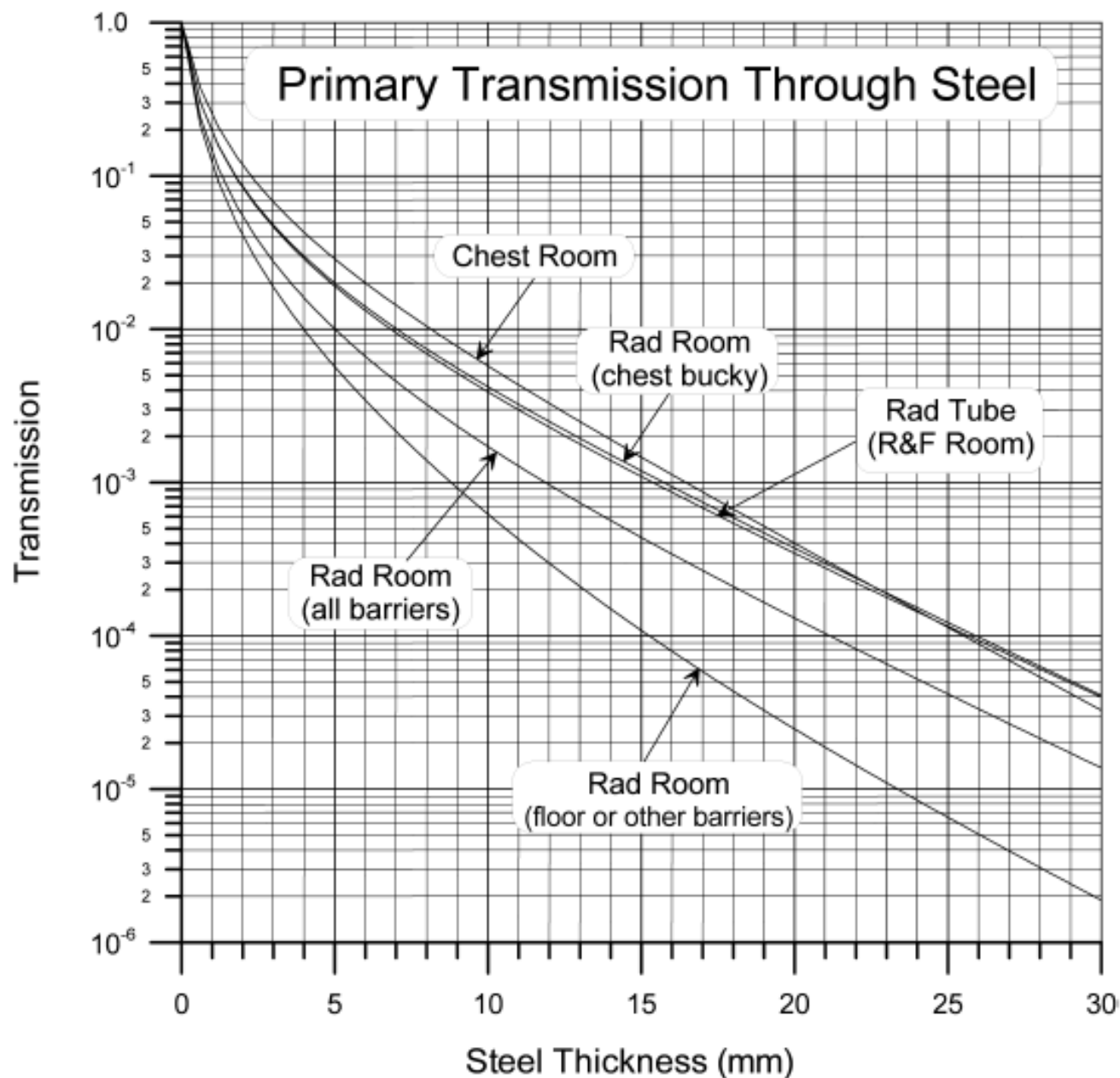


Fig. B.5. Primary broad-beam transmission through steel calculated for the clinical workload distributions in Table 4.2.

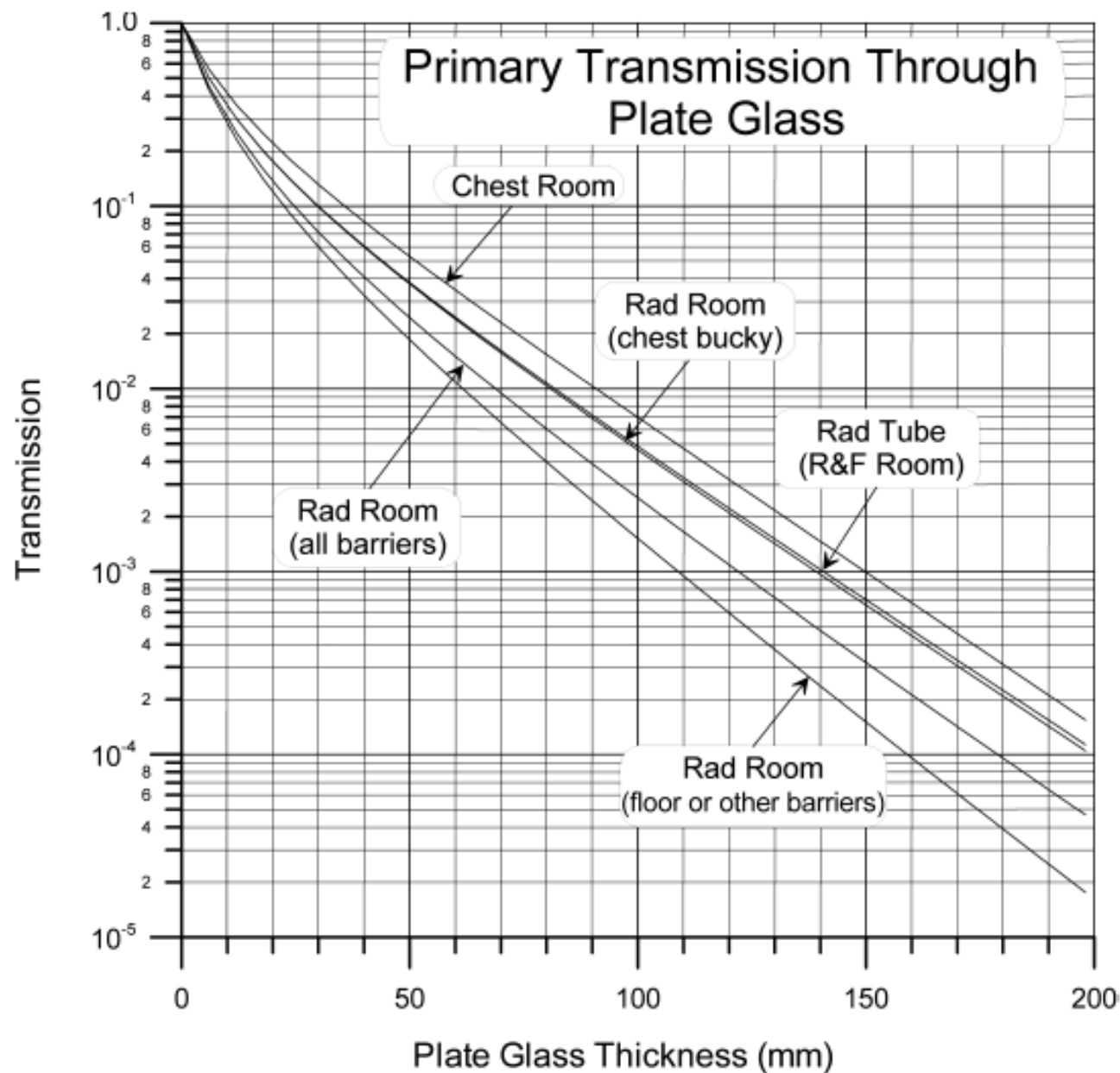
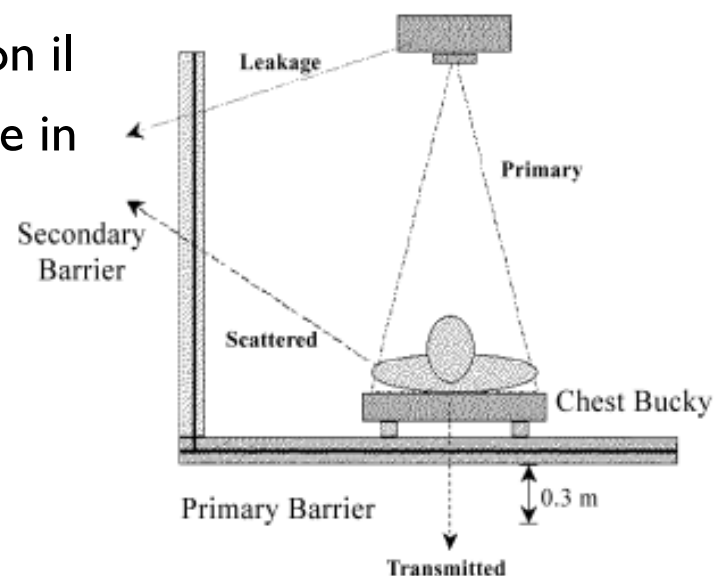


Fig. B.6. Primary broad-beam transmission through plate glass calculated for the clinical workload distributions in Table 4.2.

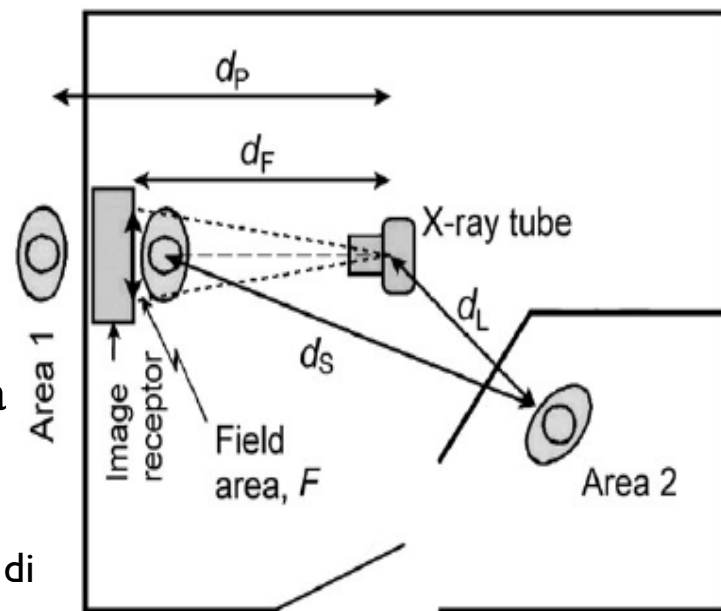
Barriere secondarie

- Le barriere secondarie servono a schermare le componenti secondarie della radiazione (radiazione diffusa e di fuga).
- L'intensità della radiazione diffusa aumenta con l'area irraggiata e con l'intensità del fascio.
- La radiazione di fuga dovrebbe essere idealmente nulla, ma poiché dalla cuffia può succedere che emergano «spifferi» di raggi X, la normativa tecnica impone che questa sia inferiore a 0,876 mGy/h a 1 metro di distanza, con il tubo in tensione e corrente massime e in funzionamento continuo.



Calcolo della schermatura secondaria

- ° Nel calcolo delle barriere secondarie bisogna tener conto anche della distanza fuoco-corpo diffondente (d_F), corpo diffondente- punto di interesse (d_S) e per la componente «di fuga» anche della distanza fuoco-punto di interesse (d_L).



$$K_{Sec}(0) = \frac{K_{Sec}^1 N}{d_{Sec}^2}$$

Kerma in aria in assenza di barriere nel punto di interesse, per N pazienti a settimana.

$$K_{Sec}(x) = K_S(x) + K_L(x)$$

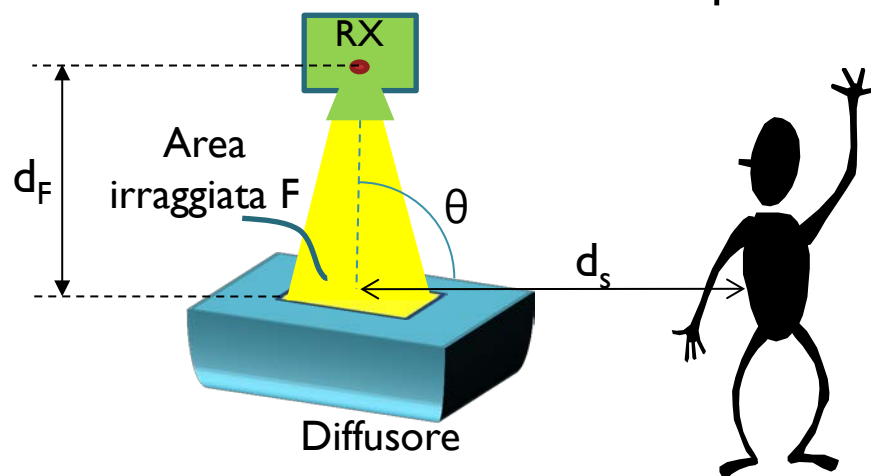
Kerma totale secondario dietro una barriera di spessore x . È dato dalla somma dei kerma in aria delle due componenti: diffusa K_S di fuga K_L

$$B_{Sec}(x) = \frac{K_{Sec}(x)}{K_{Sec}(0)} = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_{Sec}^2}{K_{Sec}^1 \cdot N}$$

Coefficiente di trasmissione per le barriere secondarie

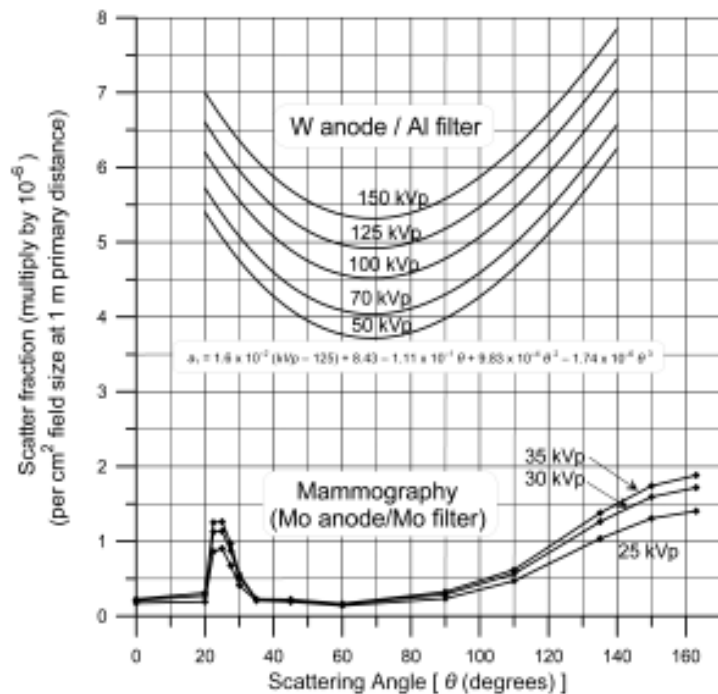
Kerma dovuto alla radiazione diffusa (K_s)

- L'intensità della radiazione diffusa dipende:
 - dall'angolo di diffusione;
 - dall'intensità del fascio;
 - dall'area irraggiata;
- Il numero di fotoni incidenti sul paziente varia linearmente con l'apertura del fascio RX, quindi se lasciamo invariati kVp, mAs e collimazione l'intensità della radiazione diffusa a 1 m è indipendente dalla distanza fuoco-paziente.



Frazione di radiazione diffusa

- In letteratura si trovano tabulati i coefficienti di diffusione $\alpha_1(\theta, kV_p)$ calcolati con i seguenti parametri: $F = 1 \text{ cm}^2$ (area irraggiata), $d_F = 1 \text{ m}$, $d_s = 1 \text{ m}$ e $I \text{ mAs}$.



$$a_1(\theta, kVp) = \frac{K_s^1(\theta, kVp)}{K_p^1(kVp)} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Kerma in aria a 1 m} \\ \text{dal diffusore} \\ \text{Kerma in aria a 1 m dal} \\ \text{fuoco, sul fascio utile} \end{array}$$

Il coefficiente di diffusione a_1 viene fornito a 1 m di distanza dal diffusore per un campo di 1 cm^2 (Appendice C, figura C.1 del NCRP n.147)

Fig. C.1. The scatter fraction $\alpha_1 \times 10^{-6}$ (i.e., multiply graph value by 10^{-6}) per cm^2 of primary beam area at 1 m. [Data of Trout and Kelley (1972) reanalyzed by Simpkin and Dixon (1998) for tungsten anode, aluminum-filtered beams. Data of Simpkin (1996b) for molybdenum anode, molybdenum filtered mammographic beams.]

Calcolo barriere secondarie: componente diffusa

- Il kerma in aria, dovuto alla sola componente diffusa, nel punto di interesse in assenza di barriera è facilmente calcolabile conoscendo la frazione di radiazione diffusa all'angolo θ (a_1), la superficie irraggiata (F), il numero di pazienti (N) e le distanze (d_s e d_F):

$$K_s(\mathcal{G}, kVp) = \frac{K_p^1(kVp) \cdot a_1}{d_s^2} \cdot \frac{F \cdot N \cdot (1-U)}{d_F^2} \quad \text{Dove } U \text{ è il fattore d'uso}$$

- Se la componente dovuta alla radiazione di fuga è talmente bassa da poter essere trascurata, possiamo calcolare il coefficiente di trasmissione considerando la sola componente diffusa:

$$B_s(x) = \frac{K_s(x)}{K_s(0)} = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_s^2 \cdot d_F^2}{K_p^1 \cdot a_1 \cdot F \cdot N \cdot (1-U)}$$

Kerma dovuto alla radiazione di fuga (K_L)

- La radiazione di fuga è limitata dagli enti normatori a 100 mR/h (0,876 mGy/h ovvero 0,0146 mGy/min) a 1 m con tensione e corrente massime applicabili in funzionamento continuo.

	Tubi radiografici	Mammografi
kVp max (kV)	150	50
I max (mA)	3-5	5

- Il rateo della radiazione di fuga a 1 m per un tubo che opera a potenziale kVp e corrente I è dato da:

$$\frac{dK_L}{dt} \propto kV_p^2 \cdot I \cdot B_{cuffia}(kV_p)$$

$B_{cuffia}(kVp)$: fattore di trasmissione della cuffia

- Per un tubo che opera in continuo a 150 kVp e 3,3 mA occorrono 2,32 mm Pb per ridurre la radiazione di fuga a 1 m a 100 mR/h

Calcolo del kerma dovuto alla radiazione di fuga (K_L)

Fissato il valore limite del rateo di fuga a 1 m, il **valore di rateo a 1 m per i kV_p e mA effettivamente applicati** risulta:

$$\left(\frac{dK_L}{dt}\right)_{1m} = \frac{0,0146 \cdot kV_p^2 \cdot B_{cuffia}(kV_p) \cdot I}{kV_{p\max}^2 \cdot B_{cuffia}(kV_{p\max}) \cdot I_{\max}}$$

$$(K_L)_{1m} = \left(\frac{dK_L}{dt}\right)_{1m} \cdot t_{\min/sett} = \left(\frac{dK_L}{dt}\right)_{1m} \cdot \frac{W_{mAmin/sett}}{I_{\max}}$$

K_L alla distanza d_L dalla cuffia per il carico di lavoro settimanale W (mAmin/sett) è dato dalla seguente relazione:

$$K_L(d_L) = \frac{0,0146 \cdot kV_p^2 \cdot B_{cuffia}(kV_p) \cdot W(kV_p)}{kV_{p\max}^2 \cdot B_{cuffia}(kV_{p\max}) \cdot I_{\max} \cdot d_L^2}$$


Coefficiente di trasmissione secondario

$$K_s(\mathcal{G}, kVp) = \frac{K_p^1(kVp) \cdot a_1}{d_s^2} \cdot \frac{F}{d_F^2}$$

$$K_L(kV_p, d_L) = \frac{0,0146 \cdot kV_p^2 \cdot W(kV_p)}{kV_{p\max}^2 \cdot I_{\max} \cdot d_L^2}$$

$$B_{\text{sec}}(x) = \frac{K_s(x) + K_L(x)}{K_s(0) + K_L(0)} = \frac{P/T}{\frac{K_p^1 \cdot a_1 \cdot F}{d_s^2 \cdot d_F^2} + \frac{0,0146 \cdot kV_p^2 \cdot W}{kV_{p\max}^2 \cdot I_{\max} \cdot d_L^2}}$$

Calcolo dello spessore della barriera secondaria

- Come per le barriere primarie, anche per quelle secondarie lo spessore si può calcolare attraverso la formula di Archer, utilizzando i parametri di interpolazione della Tabella C I dell'appendice C (NCRP n.147)  Tabella C.1
barriere secondarie
forniti sia in funzione dei kVp che della tipologia di sala per diversi materiali schermanti

$$x_{\text{sec}} = \frac{1}{\alpha \cdot \gamma} \ln \frac{\left(\frac{1}{B_{\text{sec}}}\right)^{\gamma} + \frac{\beta}{\gamma}}{1 + \frac{\beta}{\gamma}}$$

Oppure si ricava lo spessore dai grafici $x = f(B)$ nell'appendice C per diversi materiali schermanti

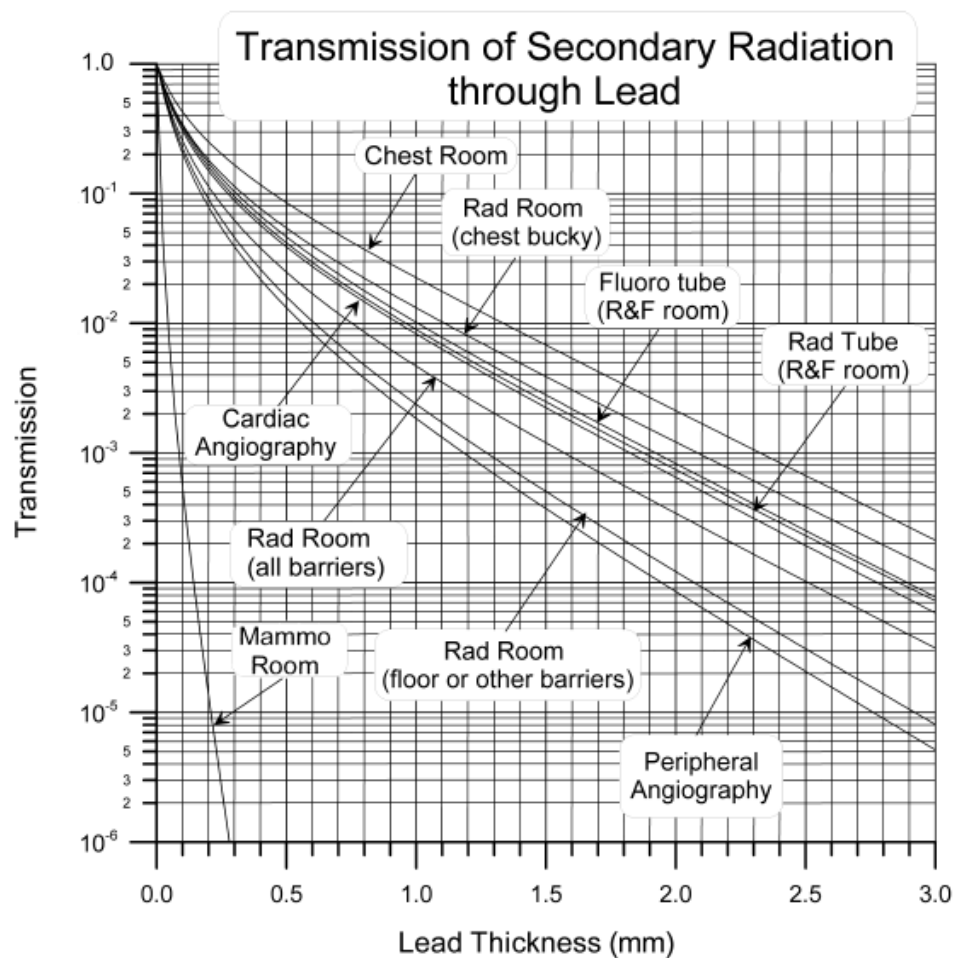


Fig. C.2. Transmission of secondary radiation through lead for the clinical workload distributions given in Table 4.2. This assumes 90 degree scattered radiation, primary beam sizes listed in Table 4.7, and leakage radiation technique factors of 150 kVp at 3.3 mA.

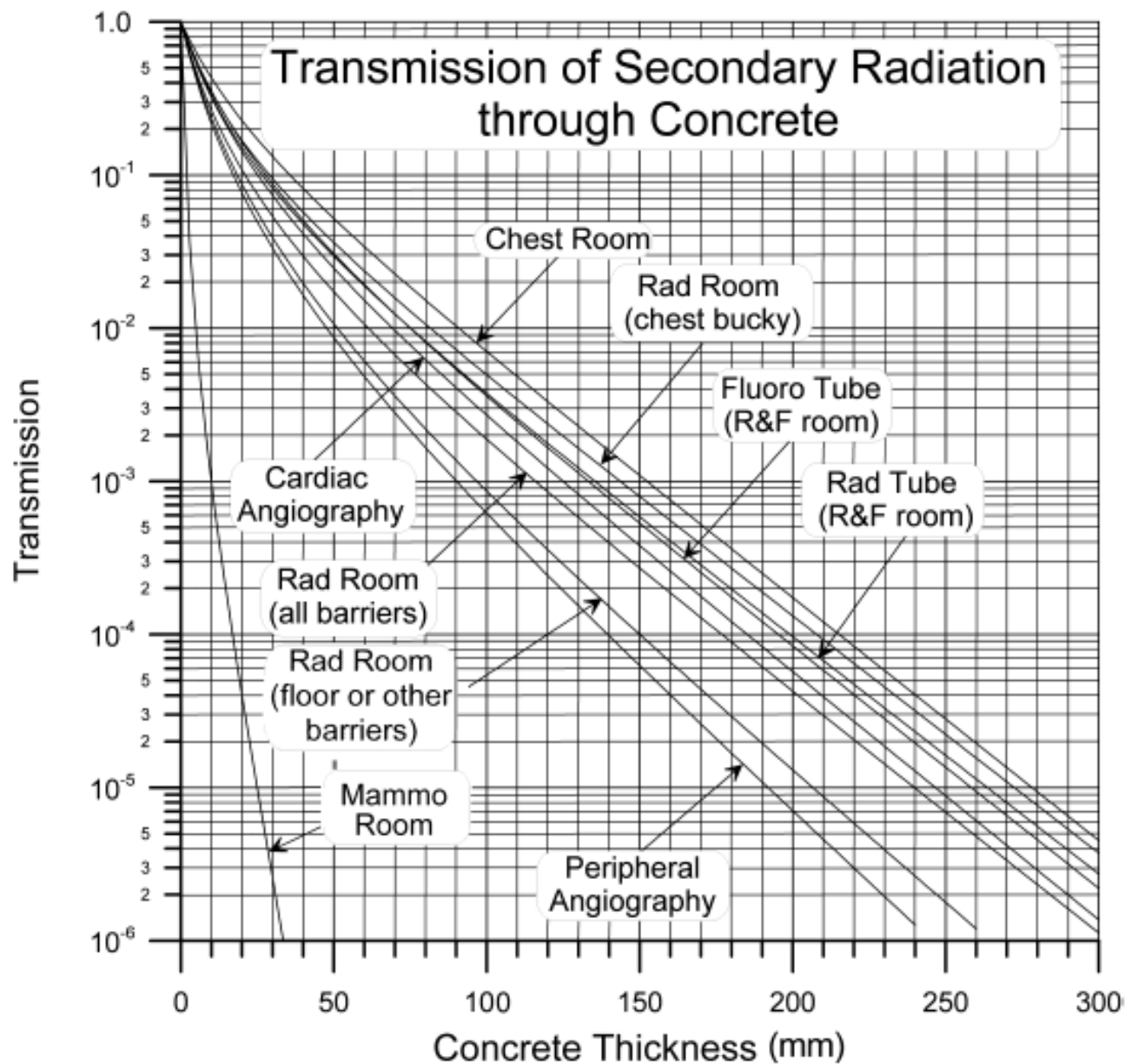


Fig. C.3. Transmission of secondary radiation through standard-weight concrete (data as in Figure C.2).

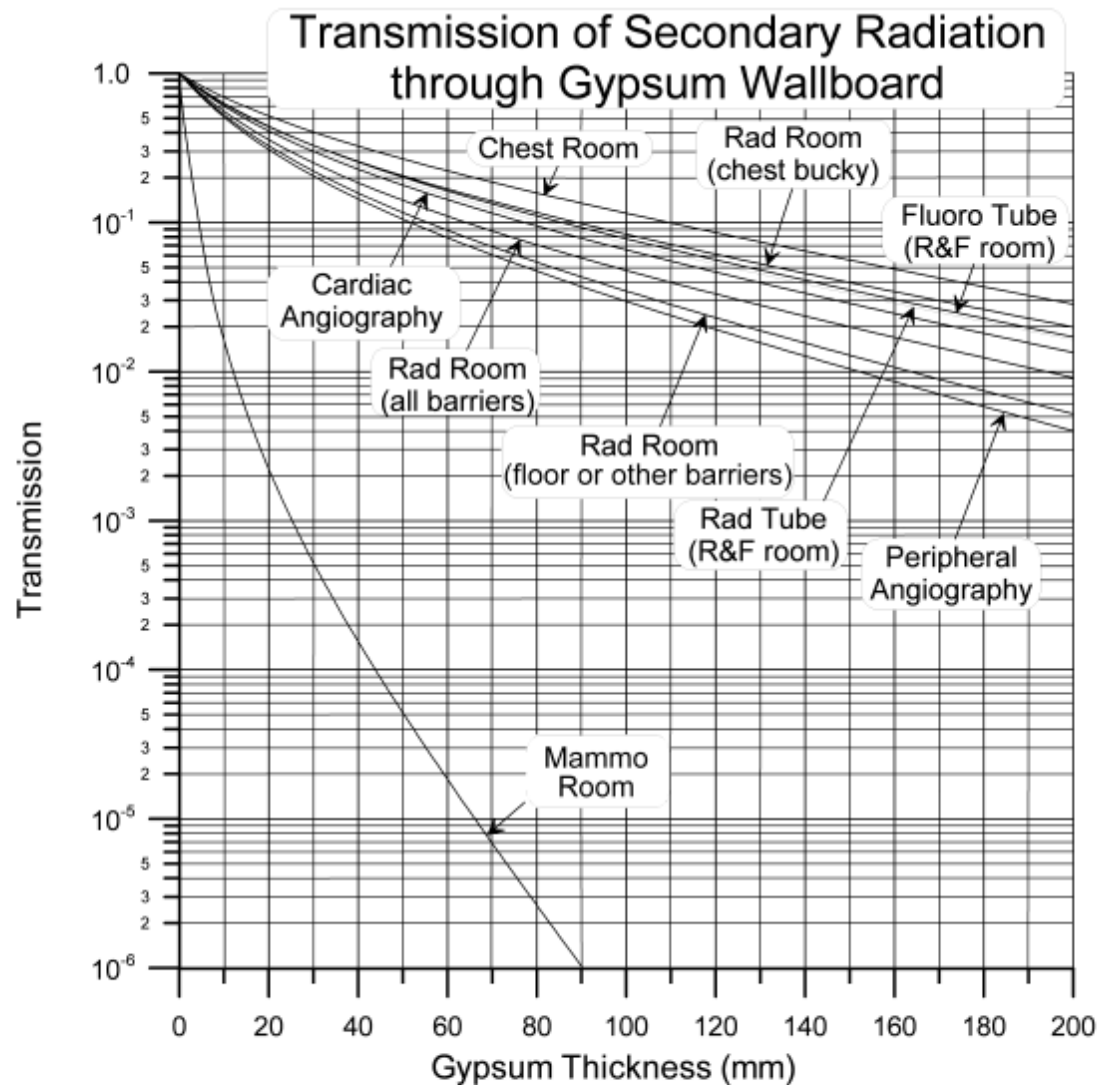


Fig. C.4. Transmission of secondary radiation through gypsum wallboard (data as in Figure C.2). A nominal 5/8 inch sheet of “Type X” gypsum wallboard has a minimum gypsum thickness of approximately 14 mm.

Equivalenza fra diversi materiali

Materiale impiegato	Rapporto dello spessore rispetto al piombo o al calcestruzzo standard
Acciaio	8 volte lo spessore richiesto in piombo
Gesso da muro	3,2 volte lo spessore richiesto in calcestruzzo standard
Vetro	1,2 volte lo spessore richiesto in calcestruzzo standard
Calcestruzzo leggero	1,3 volte lo spessore richiesto in calcestruzzo standard