

CÁLCULO DE ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA EM BLINDAGENS  
MÚLTIPLAS ATRAVÉS DA TÉCNICA DO NÚCLEO-PONTUAL  
CORRIGIDA PELO FATOR DE CRESCIMENTO

GRACIETE SIMÕES DE ANDRADE E SILVA

E

JOSÉ RUBENS MAIORINO

CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ÁREA DE FÍSICA DE REATORES

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

SÃO PAULO - SP

RESUMO

*Descreve-se*  
Este trabalho descreve um código de computação, que está sendo desenvolvido pelos autores, para calcular a atenuação de radiação gama em blindagens múltiplas devido fontes de diferentes formas geométricas, através da técnica do núcleo-pontual corrigida pelo fator de crescimento. Neste trabalho utiliza-se a fórmula de Capo para o fator de crescimento, e alternativamente, conforme o caso específico, a técnica de Broder, ou a de Goldstein, para o tratamento de blindagens múltiplas. Resultados numéricos são encontrados para diferentes problemas amostra, através das duas técnicas (Broder-Capo ou Goldstein), com o objetivo de ilustrar o trabalho, até o momento, realizado. O código, quando finalizado, permitirá sua aplicação no projeto de blindagem de fontes de radiação gama, tais como, blindagens de radioisótopos. (autor)

## I . INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um código de computação para o cálculo da atenuação de radiação gama em blindagens múltiplas devido fontes de diferentes formas geométricas, bem como o cálculo das doses absorvidas e/ou equivalentes em diferentes posições, através da técnica do núcleo-pontual corrigida pelo fator de crescimento. Embora esta técnica seja antiga, ela é muitíssima aplicada, com grande confiabilidade, nos cálculos de blindagens para fontes de radiação gama.

A técnica do núcleo-pontual consiste em expressar o fluxo de gamas, num ponto  $r$  devido uma fonte com distribuição arbitrária, como a somatória (integral) das contribuições individuais dos pontos que constituem a fonte, no ponto de interesse, ou seja :

$$\phi(r) = \int_V s(r') K(r', r) d^3 r', \quad (1)$$

onde :

$$\begin{aligned} s(r') &= \text{distribuição espacial da fonte,} \\ k(\underline{r}'; \underline{r}) &= \text{fluxo em } \underline{r} \text{ devido uma fonte de} \\ &\quad \text{intensidade unitária localizada} \\ &\quad \text{em } \underline{r}' \text{ (núcleo-pontual);} \end{aligned}$$

e sendo a integral efetuada no volume da fonte.

O núcleo-pontual é a solução da equação de transporte para radiação gama devido uma fonte pontual. Entretanto é comum decompor-se o campo de radiação em duas componentes : a componente não-espalhada ( não sofre colisão) e a espalhada. Para o cálculo da componente não-espalhada não é necessário a solução da equação de transporte. É interessante notar que para pequenas espessuras a componente não-espalhada é a dominante, porém quanto mais espessa é a blindagem, será maior a componente espalhada. Para se considerar esta última componente deve-se solucionar diretamente a equação de transporte ou corrigir a componente não-espalhada por um fator denominado fator de crescimento (build-up factor).

Neste trabalho, considera-se que o núcleo-pontual possa ser expresso pela contribuição não-espalhada corrigida pelo fator de crescimento, ou seja :

$$K(\underline{r}', \underline{r}) = B(\mu_0 |\underline{r} - \underline{r}'|, E_0) \exp[-\mu_0 |\underline{r} - \underline{r}'|] / 4\pi |\underline{r} - \underline{r}'|^2 \quad (2)$$

onde :

$\mu_0$  = coeficiente de atenuação linear do meio entre a posição da fonte ( $x'$ ) e o ponto ( $x$ ),

$B(\mu_0 |x - x'|)$  = fator de crescimento.

O fator de crescimento é definido como a razão da resposta total (fluxo, dose, etc...) na posição do detector ( $x$ ) para a resposta devido apenas à componente não-espalhada, portanto, seu conhecimento requer a solução da equação de transporte para a radiação gama, a qual tem sido encontrada em meios infinitos para vários materiais de interesse, em blindagem, e várias energias de fonte ( $E_0$ ), através do método dos momentos. Deste modo, esse fator pode ser encontrado em forma tabular, como por exemplo, no trabalho de Goldstein e Wilkins /1/. Entretanto, esforços foram realizados para expressar os valores de Goldstein e Wilkins em ajustes empíricos e desta forma eliminar a necessidade de interpolar dados, bem como, possibilitar meios de se operar matematicamente com o fator de crescimento. Dentre vários ajustes empíricos, citam-se os de Taylor, Berger e Capo.

Neste trabalho usa-se a fórmula de Capo /2/ que é representada por um polinômio cúbico da forma :

$$B(\mu_0 x, E_0) = \sum_{i=0}^3 \beta_i [\mu_0 x]^i = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^4 C_{i,j} [\mu_0 x]^i [1/E_0]^j \quad (3)$$

onde :

$\mu_0 x$  = nº de comprimento de relaxação

$E_0$  = energia do raio gama

$C_{i,j}$  = coeficientes que podem ser encontrados em /2,3/ para vários materiais de blindagem. Vide Tabela 1.

Salienta-se que a escolha dessa fórmula empírica deve-se ao fato de ser considerada o melhor ajuste aos dados de Goldstein e Wilkins. Nota-se também que essa fórmula fornece expansões polinomiais em termos da distância e energia da fonte evitando-se, assim, a necessidade de interpolação com relação a essas duas variáveis.

Como a fórmula de Capo é válida para apenas uma blindagem entre a fonte e o detector, para blindagens múltiplas, pode-se usar o método de Broder /4/ para expressar o fator de crescimento deste sistema em função do fator de crescimento de cada blindagem individual, ou seja:

$$B(E_0, \sum_{l=1}^N \mu_l t_l) = \sum_{k=2}^N B_k(E_0, \sum_{l=1}^k \mu_l t_l) - \sum_{k=2}^N B_k(E_0, \sum_{l=1}^{k-1} \mu_l t_l), \quad (4)$$

onde :

- $N$  = nº de blindagens,
- $\mu_l$  = coeficiente de atenuação linear para a  $l$ -ésima blindagem,
- $t_l$  = espessura da  $l$ -ésima blindagem,
- $B_k$  = fator de crescimento da  $k$ -ésima blindagem dada, por exemplo, pela fórmula de Capo.

Alternativamente, ou no caso da blindagem ser constituída de materiais que não possuam ajustes para o fator de crescimento dado pela fórmula de Capo, usa-se, neste trabalho, a técnica de Goldstein /5/ e o ajuste cúbico,

$$B(\mu_0 r, E_0) = 1,0 + a(\mu_0 r) + b(\mu_0 r)^2 + c(\mu_0 r)^3 \quad (5)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são valores tabulados para a energia da fonte  $E_0$  e de um número atômico efetivo ( $Z_{\text{eff}}$ ) do sistema de blindagem que é dado por:

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^N Z_i \mu_i t_i}{\sum_{i=1}^N \mu_i t_i} \quad (6)$$

onde :

- $Z_i$  = nº atômico da  $i$ -ésima blindagem
- $\mu_i$  = coeficiente de atenuação da blindagem  $i$
- $t_i$  = espessura da  $i$ -ésima blindagem

### III . DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

Através dessas fórmulas citadas acima, calcula-se, neste trabalho, o fator de crescimento para solucionar numericamente a Eq. (1) no caso de blindagens múltiplas e fontes isotropicamente distribuídas com as seguintes configurações :

- i) pontual
- ii) plana
- iii) disco
- iv) linear
- v ) esférica (superficial e volumétrica)
- vi) cilíndrica (superficial e volumétrica)
- vii) placa plana

Para tal, desenvolve-se um programa que calcula o fluxo de gamas numa posição , bem como a dose equivalente dada por :

$$\dot{H} \text{ (rem/hr)} = 5,767 \times 10^{-5} (\mu_a^0/\rho)_{th} E_0 \phi(E_0, r) \quad (7)$$

onde  $(\mu_a^0/\rho)_{th}$  é o coeficiente de atenuação por unidades de massa ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) do tecido humano na energia da fonte ( $E_0$ ).

As entradas para o código serão: geometria, intensidade, e energia da fonte, definições do sistema de blindagem e a posição do detector. Salienta-se que os coeficientes de atenuação para os vários materiais de interesse serão ajustados por relações empíricas e incorporados ao programa fonte.

Como exemplo, daremos o procedimento matemático considerando-se uma fonte plana (Figura 1).

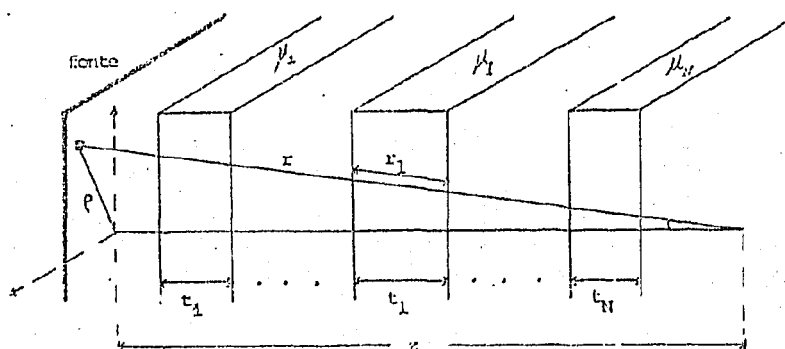


Figura 1 : Fonte Plana com N tipos diferentes de blindagens

Para uma fonte plana o fluxo no ponto P é dado por :

$$\phi(z) = s \int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\infty} \rho d\rho \frac{\exp\left(-\sum_{l=1}^N \mu_l t_l\right)}{4\pi r^2} B\left(E_0, \sum_{l=1}^N \mu_l r_l\right) \quad (8)$$

ou

$$\phi(z) = \frac{s}{2} \int_z^{\infty} \exp(-\bar{\mu} r) B\left(E_0, \sum_{l=1}^N \frac{\mu_l t_l}{z} r\right) \frac{dr}{r} \quad (9)$$

onde :

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{l=1}^N \mu_l t_l}{z}$$

Aplicando-se a fórmula de Broder fica-se com:

$$\phi(z) = \frac{s}{2} \left\{ \int_z^{\infty} \left[ \sum_{k=1}^N B_k \left( E_0, \sum_{l=1}^k \frac{\mu_l t_l}{z} r \right) - \sum_{k=2}^N B_k \left( E_0, \sum_{l=1}^{k-1} \frac{\mu_l t_l}{z} r \right) \right] \frac{\exp(-\bar{\mu} r)}{r} dr \right\} \quad (10)$$

Substituindo-se  $B_k$ , por exemplo, pela fórmula de Capo tem-se:

$$\begin{aligned} \phi(z) = & \frac{s}{2} \left\{ \int_z^{\infty} \sum_{k=1}^N \left[ \sum_{i=0}^3 \left( \sum_{j=0}^4 (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^k \frac{\mu_l t_l}{z} r \right)^i \right] \frac{\exp(-\bar{\mu} r)}{r} dr \right. \\ & \left. - \int_z^{\infty} \sum_{k=2}^N \left[ \sum_{i=0}^3 \left( \sum_{j=0}^4 (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^{k-1} \frac{\mu_l t_l}{z} r \right)^i \right] \frac{\exp(-\bar{\mu} r)}{r} dr \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

Abrindo-se as somatórias em  $\underline{1}$  e agrupando-se os termos chega-se a :

$$\begin{aligned}
 \vartheta(z) = & \frac{S}{2} \left[ \underbrace{\left( \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{0j} (1/E_0)^j \right) \right) - \sum_{k=2}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{0j} (1/E_0)^j \right)}_A \right] \int_z^{\infty} \frac{\exp(-\bar{\mu}r)}{r} dr \\
 & + \underbrace{\left[ \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{1j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^k \frac{\mu_1 t_1}{z} \right) - \sum_{k=2}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{1j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^{k-1} \frac{\mu_1 t_1}{z} \right) \right]}_B \int_z^{\infty} \exp(-\bar{\mu}r) dr \\
 & + \underbrace{\left[ \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{2j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^k \frac{\mu_1 t_1}{z} \right)^2 - \sum_{k=2}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{2j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^{k-1} \frac{\mu_1 t_1}{z} \right)^2 \right]}_C \int_z^{\infty} \exp(-\bar{\mu}r) r dr \\
 & + \underbrace{\left[ \sum_{k=1}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{3j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^k \frac{\mu_1 t_1}{z} \right)^3 - \sum_{k=2}^N \left( \sum_{j=0}^4 C_{3j} (1/E_0)^j \right) \left( \sum_{l=1}^{k-1} \frac{\mu_1 t_1}{z} \right)^3 \right]}_D \int_z^{\infty} \exp(-\bar{\mu}r) r^2 dr
 \end{aligned} \tag{12}$$

Resolvendo-se as integrais,

$$\begin{aligned}
 \vartheta(z) = & \frac{S}{2} \left\{ A E_1 (\bar{\mu}z) + \frac{B}{\bar{\mu}} \exp(-\bar{\mu}z) + \frac{C}{\bar{\mu}} \exp(-\bar{\mu}z) \left( z + \frac{1}{\bar{\mu}} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{D}{\bar{\mu}} \exp(-\bar{\mu}z) \cdot \left( z^2 + \frac{2z}{\bar{\mu}} + \frac{2}{\bar{\mu}^2} \right) \right\}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Para se calcular a dose equivalente basta substituir a Eq. (13) na Eq. (7).

### III. RESULTADOS

Os resultados numéricos apresentados nesta seção têm por objetivo a comparação entre os dois métodos citados anteriormente (Broder-Capo ou Goldstein).

Como ilustração, na Tabela 2, mostra-se as doses para várias posições do detector num sistema constituído de 2 blindagens (Figura 2) - uma de chumbo com espessura de 5 cm e outra de ferro com espessura de 5 cm - devido uma fonte superficial de intensidade  $10^{10}$  gamas/cm<sup>2</sup>/seg, distribuída num disco de raio 1 cm, com energia de 1 MeV.

Na Tabela 3, tem-se as doses para fontes com várias geometrias e um sistema de blindagem constituído de 2 blindagens - uma de H<sub>2</sub>O com 1 m de espessura e outra de ferro com 20 cm. Para cada geometria foram dados os parâmetros de entrada adequados, tais como: altura, raio, largura, etc...; e a intensidade da fonte foi mantida em  $2 \times 10^{10}$  gamas/unidade de medida/cm<sup>2</sup>, com energia de 1,969096 MeV.

### IV. CONCLUSÃO

Pode-se notar na Tabela 2 que a diferença percentual entre os dois métodos é da ordem de 8,5 a 11% e que na Tabela 3 é da ordem de 1,5 a 17,9% (aumenta à medida que a geometria torna-se mais complexa), levando-nos a crer na confiabilidade do programa computacional, pois as fórmulas empregadas para o cálculo das doses são completamente diferentes. Entretanto uma verificação final será feita após a implantação do código ISOSILD do RSIC Computer Code Collection (Oak Ridge National Laboratory) quando repetir-se-ã todos os cálculos realizados por meio das técnicas descritas nas seções anteriores.

Vale salientar que este código ISOSILD usa a técnica do núcleo-pontual e a fórmula de Taylor para o fator de crescimento.



Tabela 1 - Valores dos parâmetros  $C_{ij}$  na fórmula de Capo para fatores de crescimento de dose - Fonte pontual isotrópica, meio infinito.

$j$	$i = 0$	1	2	3	
0	$1.01094 \cdot 10^0$	$1.16772 \cdot 10^{-1}$	$-7.65869 \cdot 10^{-3}$	$1.67068 \cdot 10^{-1}$	Água
1	$-6.00394 \cdot 10^{-2}$	$2.32125 \cdot 10^0$	$-1.79023 \cdot 10^{-2}$	$5.69295 \cdot 10^{-4}$	
2	$7.20778 \cdot 10^{-2}$	$-2.12801 \cdot 10^0$	$2.41735 \cdot 10^{-1}$	$-7.96332 \cdot 10^{-3}$	
3	$-3.01498 \cdot 10^{-2}$	$7.67783 \cdot 10^{-1}$	$-4.34443 \cdot 10^{-2}$	$7.23758 \cdot 10^{-3}$	
4	$3.94733 \cdot 10^{-3}$	$-9.08139 \cdot 10^{-2}$	$-1.34203 \cdot 10^{-2}$	$-9.87237 \cdot 10^{-1}$	
0	$1.00768 \cdot 10^0$	$-1.03807 \cdot 10^{-2}$	$1.30705 \cdot 10^{-2}$	$-3.29348 \cdot 10^{-1}$	Alumínio
1	$-4.98085 \cdot 10^{-2}$	$3.32216 \cdot 10^0$	$-1.58167 \cdot 10^{-1}$	$4.60315 \cdot 10^{-3}$	
2	$7.23425 \cdot 10^{-2}$	$-5.52427 \cdot 10^0$	$6.89496 \cdot 10^{-1}$	$-2.04255 \cdot 10^{-2}$	
3	$-3.93841 \cdot 10^{-2}$	$4.16700 \cdot 10^0$	$-5.59836 \cdot 10^{-1}$	$2.00554 \cdot 10^{-2}$	
4	$7.35778 \cdot 10^{-3}$	$-1.04638 \cdot 10^0$	$1.41308 \cdot 10^{-1}$	$-5.29934 \cdot 10^{-3}$	
0	$1.01460 \cdot 10^0$	$-4.12104 \cdot 10^{-2}$	$1.88074 \cdot 10^{-3}$	$1.20198 \cdot 10^{-3}$	Ferro
1	$-1.88657 \cdot 10^{-1}$	$2.72752 \cdot 10^0$	$1.00217 \cdot 10^{-1}$	$-2.83313 \cdot 10^{-3}$	
2	$6.38649 \cdot 10^{-1}$	$-3.76728 \cdot 10^0$	$-1.31988 \cdot 10^{-1}$	$2.06002 \cdot 10^{-2}$	
3	$-6.55159 \cdot 10^{-1}$	$2.42384 \cdot 10^0$	$1.68976 \cdot 10^{-1}$	$-1.75251 \cdot 10^{-2}$	
4	$1.90742 \cdot 10^{-1}$	$-5.54657 \cdot 10^{-1}$	$-5.80710 \cdot 10^{-2}$	$4.75673 \cdot 10^{-3}$	
0	$9.3368 \cdot 10^{-1}$	$1.2046 \cdot 10^{-1}$	$-4.1739 \cdot 10^{-3}$	$1.0626 \cdot 10^{-4}$	Concreto
1	$3.2095 \cdot 10^0$	$1.3049 \cdot 10^0$	$4.5191 \cdot 10^{-2}$	$-1.4393 \cdot 10^{-3}$	
2	$-1.2066 \cdot 10^1$	$1.0892 \cdot 10^0$	$7.9888 \cdot 10^{-2}$	$-2.3189 \cdot 10^{-3}$	Ceram
3	$1.1583 \cdot 10^1$	$-1.1306 \cdot 10^0$	$-1.1193 \cdot 10^{-1}$	$7.3120 \cdot 10^{-3}$	
4	$-3.1406 \cdot 10^0$	$2.3122 \cdot 10^{-1}$	$4.5724 \cdot 10^{-2}$	$-1.7597 \cdot 10^{-1}$	
0	$1.1552 \cdot 10^0$	$-4.2798 \cdot 10^{-2}$	$1.3402 \cdot 10^{-2}$	$-1.0598 \cdot 10^{-4}$	Concreto
1	$-1.4852 \cdot 10^0$	$3.3548 \cdot 10^0$	$-1.1491 \cdot 10^{-1}$	$1.3261 \cdot 10^{-1}$	
2	$4.1211 \cdot 10^0$	$-5.0124 \cdot 10^0$	$4.5050 \cdot 10^{-1}$	$-6.4346 \cdot 10^{-3}$	Magnetita
3	$-4.8274 \cdot 10^0$	$3.9411 \cdot 10^0$	$-3.3907 \cdot 10^{-1}$	$5.2485 \cdot 10^{-3}$	
4	$1.5641 \cdot 10^0$	$-1.0845 \cdot 10^0$	$8.8020 \cdot 10^{-2}$	$-1.3924 \cdot 10^{-3}$	
0	$2.1266 \cdot 10^{-1}$	$6.9926 \cdot 10^{-2}$	$-4.2108 \cdot 10^{-3}$	$8.2296 \cdot 10^{-4}$	Concreto
1	$7.4394 \cdot 10^{-1}$	$2.3276 \cdot 10^0$	$4.5025 \cdot 10^{-2}$	$-4.6242 \cdot 10^{-3}$	
2	$-1.9041 \cdot 10^0$	$-2.3910 \cdot 10^0$	$1.4831 \cdot 10^{-2}$	$8.0834 \cdot 10^{-3}$	Ferrofosforoso
3	$3.1771 \cdot 10^{-1}$	$1.5490 \cdot 10^0$	$2.2113 \cdot 10^{-2}$	$-6.1558 \cdot 10^{-3}$	
4	$-4.5739 \cdot 10^{-2}$	$-3.9851 \cdot 10^{-1}$	$-1.1561 \cdot 10^{-2}$	$1.6045 \cdot 10^{-3}$	
0	$9.2229 \cdot 10^{-1}$	$5.6213 \cdot 10^{-2}$	$-1.5123 \cdot 10^{-2}$	$2.2190 \cdot 10^{-2}$	Concreto
1	$-2.2516 \cdot 10^{-1}$	$2.5211 \cdot 10^0$	$1.7424 \cdot 10^{-1}$	$-1.6242 \cdot 10^{-2}$	
2	$6.6842 \cdot 10^{-1}$	$-2.9568 \cdot 10^0$	$-3.5783 \cdot 10^{-1}$	$3.7158 \cdot 10^{-2}$	Barita
3	$-4.7302 \cdot 10^{-1}$	$6.7814 \cdot 10^{-1}$	$5.1702 \cdot 10^{-1}$	$-3.6732 \cdot 10^{-2}$	
4	$-3.5229 \cdot 10^{-1}$	$1.2329 \cdot 10^{-1}$	$-1.8144 \cdot 10^{-1}$	$1.0835 \cdot 10^{-2}$	
0	$9.59342 \cdot 10^{-1}$	$6.78254 \cdot 10^{-2}$	$-2.26626 \cdot 10^{-2}$	$6.39872 \cdot 10^{-1}$	Chumbo
1	$1.13722 \cdot 10^{-1}$	$4.50412 \cdot 10^{-1}$	$7.55191 \cdot 10^{-3}$	$1.52094 \cdot 10^{-4}$	
2	$-7.39816 \cdot 10^{-2}$	$-2.15037 \cdot 10^{-1}$	$5.10254 \cdot 10^{-3}$	$-6.04857 \cdot 10^{-4}$	
3	$1.87767 \cdot 10^{-2}$	$4.05189 \cdot 10^{-2}$	$-1.89332 \cdot 10^{-3}$	$2.42263 \cdot 10^{-4}$	
4	$-2.04254 \cdot 10^{-3}$	$-3.40802 \cdot 10^{-3}$	$1.93415 \cdot 10^{-4}$	$-2.93866 \cdot 10^{-5}$	
5	$7.93621 \cdot 10^{-5}$	$1.06510 \cdot 10^{-1}$	$-6.24306 \cdot 10^{-6}$	$1.13914 \cdot 10^{-6}$	
0	$1.01765 \cdot 10^0$	$4.24238 \cdot 10^{-2}$	$-1.42252 \cdot 10^{-2}$	$5.93162 \cdot 10^{-1}$	Urânio
1	$-1.65482 \cdot 10^{-2}$	$3.31303 \cdot 10^{-1}$	$-2.90268 \cdot 10^{-3}$	$-1.84501 \cdot 10^{-4}$	
2	$5.84308 \cdot 10^{-3}$	$-1.24381 \cdot 10^{-1}$	$6.06091 \cdot 10^{-3}$	$-7.15165 \cdot 10^{-3}$	
3	$-8.56681 \cdot 10^{-4}$	$1.62433 \cdot 10^{-2}$	$-1.24102 \cdot 10^{-3}$	$3.86282 \cdot 10^{-5}$	
4	$4.03127 \cdot 10^{-5}$	$-7.01931 \cdot 10^{-1}$	$6.59820 \cdot 10^{-5}$	$-2.68878 \cdot 10^{-6}$	

\* Esta tabela foi tirada de referência /3/, pag. 217.

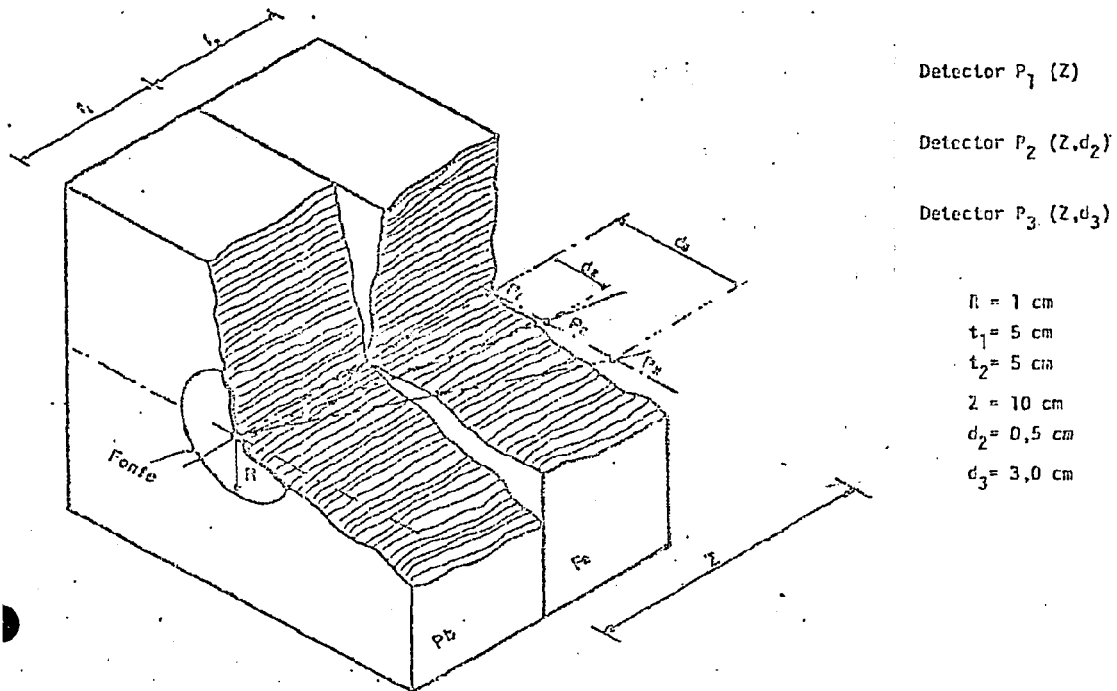
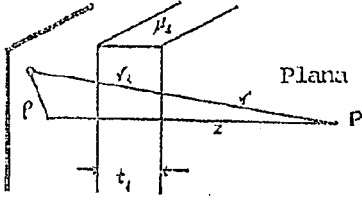
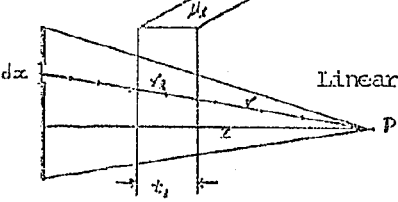
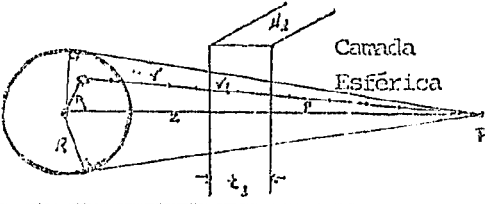
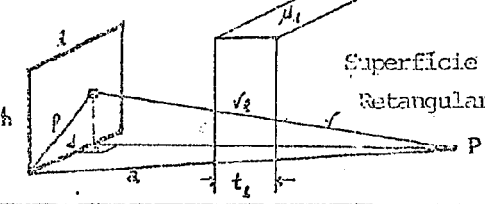
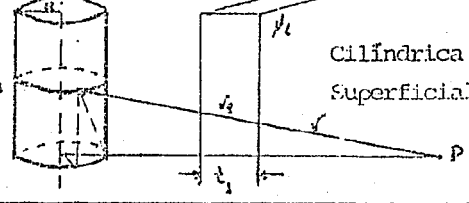
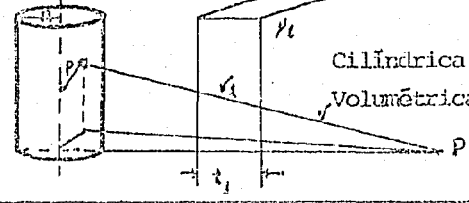


Figura 2 - Fonte superficial distribuída num disco com 2 blindagens paralelas.

Tabela 2 - Comparação entre a Fórmula de Broder-Capo e a de Goldstein, para uma fonte superficial distribuída num disco com 2 blindagens paralelas.

Detector	BRODER-CAPO			GOLDSTEIN	
	Fator de Crescimento	Fluxo Espalhado ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1}$ )	Dose (rem/h)	Fluxo Espalhado ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{seg}^{-1}$ )	Dose (rem/h)
$P_1$	5,80937	$2,83914 \times 10^5$	0,491200	$3,16014 \times 10^5$	0,546736
$P_2$	5,81687	$2,81453 \times 10^5$	0,486942	$3,13142 \times 10^5$	0,541767
$P_3$	6,07683	$2,09044 \times 10^5$	0,361667	$2,29233 \times 10^5$	0,396596

Tabela 3 : Comparação entre a Fórmula de Broder - Capo e a de Goldstein para fontes com várias geometrias.

Fonte	Broder-Capo	Goldstein
	Dose (rem/hr)	Dose (rem/hr)
Pontual	$0,371264 \times 10^{-4}$	$0,376900 \times 10^{-4}$
 <p>Plana</p>	0,291553	0,304254
 <p>Linear</p>	$0,148355 \times 10^{-3}$	$0,162072 \times 10^{-3}$
 <p>Camada Esférica</p>	$0,349282 \times 10^{-1}$	$0,381422 \times 10^{-1}$
 <p>Superfície Retangular</p>	$0,164407 \times 10^{-2}$	$0,180374 \times 10^{-2}$
 <p>Cilíndrica Superficial</p>	$0,687339 \times 10^{-3}$	$0,750890 \times 10^{-3}$
 <p>Cilíndrica Volumétrica</p>	$0,306597 \times 10^{-3}$	$0,361725 \times 10^{-3}$

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 . H. Goldstein and J. R. Wilkins, Jr. : NYO-3075 (1954).
- 2 . M. A. Capo : APEX-510 (1958).
- 3 . Engineering Compendium on Radiation Shielding : Vol. I
- 4 . D. L. Broder, et al. : Sovietic Journal of Atomic Energy 12,  
26-31 (1962).
- 5 . H. Goldstein : Fundamental Aspects of Reactor Shielding, Addison-  
Wesley Publishing Co (1959).