

# Efeitos da radiação espalhada e produzida pela blindagem de concreto de radioterapia sobre doses equivalentes, doses efetivas equivalentes, doses efetivas e fatores de risco para carcinogênese radioinduzida nos pacientes

Kelmo Lins Braga<sup>1\*</sup>, Edson Ramos de Andrade<sup>2</sup>, Wilson Freitas Rebello<sup>3</sup>, Sérgio Gavazza<sup>1</sup>, Jardel Lemos Thalhofer<sup>4</sup>, Marcos Paulo Cavaliere de Medeiros<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia,  
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270,  
Praia Vermelha – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

<sup>2</sup>Centro Tecnológico do Exército  
Avenida das Américas – 28705, 23020-470  
Guaratiba – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

<sup>3</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-900,  
Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Avenida Horácio Macedo, 2030 – 21945-970,  
Fundão, Rio de Janeiro – RJ – Brasil

\*kelmo.lins@gmail.com

**RESUMO:** Dentro da sala de radioterapia, além do feixe primário, há também radiação secundária devido à fuga no cabeçote do acelerador e ao espalhamento provocado por objetos, corpo do paciente e pela própria blindagem da sala, que é dimensionada para proteção de indivíduos externos, desconsiderando seus efeitos no paciente. Este trabalho estudou tais efeitos considerando a contribuição da blindagem de concreto nas doses equivalentes sobre os órgãos, efetiva no indivíduo e nos fatores de risco de desenvolvimento de câncer secundário segundo relatório BEIR VII. Modelagens, em código MCNPX, do acelerador linear Varian 2100 C/D operando a 18MV, com fantoma MAX representando o paciente, e sala de radioterapia, com e sem blindagem (paredes, piso e teto), foram utilizadas para cálculo de doses equivalentes e efetiva e fatores de risco. A diferença dos valores obtidos possibilitou avaliar os efeitos da blindagem de concreto no paciente. As modelagens foram feitas com o acelerador operando em quatro campos (0°, 90°, 180° e 270°), simulando protocolo de tratamento de câncer de próstata do INCA. Resultados indicam que o concreto tem contribuição média de 20% na dose equivalente depositada nos órgãos/tecidos, 4,65% na dose efetiva no indivíduo e 26,81% no risco do paciente desenvolver câncer secundário radioinduzido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Blindagem, Concreto, Radioterapia, MCNPX, BEIR VII..

**ABSTRACT:** Within a radiotherapy room, in addition to the primary beam, there is also secondary radiation due to the leakage of the accelerator head and the scattering caused by room objects, patient's body and even the shield room itself, which is sized to protect the external individuals disregarding its effects on the patient. This work studied the effect of concrete shield over the patient considering its contribution in equivalent doses in organs, effective dose in patients and secondary cancer development risk factors according to BEIR VII report. Modeling in MCNPX code, linear accelerator Varian 2100 C/D operating at 18MV, MAX phantom representing the patient and radiotherapy room with and without shielding (walls, floor and ceiling) were used to calculate equivalent and effective doses and risk factors. The difference of the obtained values allowed us to evaluate the effects of shielding on the patient. The modeling used the accelerator operating in four fields (0°, 90°, 180° and 270°), simulating INCA's treatment protocol for prostate cancer. Results indicate that the concrete has an average contribution of 20% in equivalent dose deposited in the organs, 4.65% in the individual effective dose and 26.81% in the patient's risk of developing radiation-induced secondary cancer

**KEYWORDS:** Shielding, Concrete, Radiotherapy, MCNPX, BEIR VII.

## 1. INTRODUÇÃO

A proteção contra os efeitos biológicos das radiações ionizantes é uma preocupação constante desde que foram percebidos seus efeitos potencialmente nocivos sobre tecidos saudáveis do ser humano. Tal preocupação tem sua relevância aumentada quando se trata de aplicações avançadas como a radioterapia considerando-se que as faixas de energia elevam-se em relação aos raios-X, utilizados em radiodiagnósticos, por um fator de  $10^2$ .

Além dos efeitos terapêuticos desejáveis dos raios-X, há potenciais efeitos secundários indesejáveis que são função da dose de radiação considerando-se, dentre outros fatores, a idade, sexo e predisposição genética do paciente. Considera-se que a dose de radiação é a única variável que pode ser efetivamente controlada. Desta forma, qualquer iniciativa que a reduza é importante e representa um avanço considerável em radioproteção e controle ambiental.

Ao longo dos anos, dentro do estudo da blindagem de salas de radioterapia, tem-se desenvolvido tanto técnicas como materiais específicos e suas combinações de forma a reduzir as doses nos indivíduos ocupacionalmente expostos

e no público em geral. Dentro das salas de radioterapia, além do feixe primário, há radiação secundária devido à fuga no cabeçote do acelerador e ao espalhamento provocado por objetos da sala, pelo corpo do paciente e até pela própria blindagem (paredes, piso e teto). O problema central é que a metodologia de dimensionamento dessa blindagem visa, tão somente, à proteção dos indivíduos fora da sala de radioterapia, desconsiderando-se seus efeitos sobre o paciente.

Diversos autores e grupos de pesquisa, como Kase et al. (2003), Facure et al. (2007), Frota et al. (2009) e Cordeiro (2013), estudaram as contribuições de blindagens de concreto de diferentes composições, contudo, em termos de atenuação e transmissão de energia apenas. Rebello e colaboradores (2012) realizaram trabalho para avaliar as contribuições do aço e do chumbo como blindagem considerando o equivalente de dose ambiente devido a nêutrons na posição do paciente. Mesbahi e colaboradores (2012) investigaram o efeito de diferentes tipos de concreto em doses devido a fotonêutrons no isocentro e na porta de entrada do labirinto utilizando fantoma de água. Este trabalho, portanto, tem por objetivo estudar por meio do código Monte Carlo N-Particle eXtended (MCNPX), a contribuição da blindagem de concreto de uma

sala de radioterapia em um tratamento de câncer de próstata, analisando diretamente seus efeitos nas doses equivalentes sobre os órgãos, efetiva no indivíduo e nos fatores de risco de desenvolvimento de câncer secundário de um paciente representado pelo fantoma MAX. Os resultados deste estudo contribuem para aumentar o conjunto de informações disponíveis acerca das doses indesejáveis sobre pacientes submetidos a tratamentos de radioterapia.

## 2. METODOLOGIA

No estudo foi utilizado o código MCNPX, versão 2.5, para modelar uma sala de radioterapia padrão (constituída de paredes, piso e teto em concreto ordinário de  $2,35 \text{ g/cm}^3$ ) com acelerador linear Varian 2100 C/D (Figura 1) operando a 18MV, simulando tratamento de câncer de próstata a 4 campos, conforme protocolo adotado pelo Instituto Nacional do Câncer (INCA), e com o fantoma em voxel MAX, desenvolvido por Kramer e colaboradores (2003), representando o paciente (Thalhofer, 2011). Os valores de doses equivalentes nos órgãos/tecidos e efetiva no paciente foram calculados para essa condição de operação.

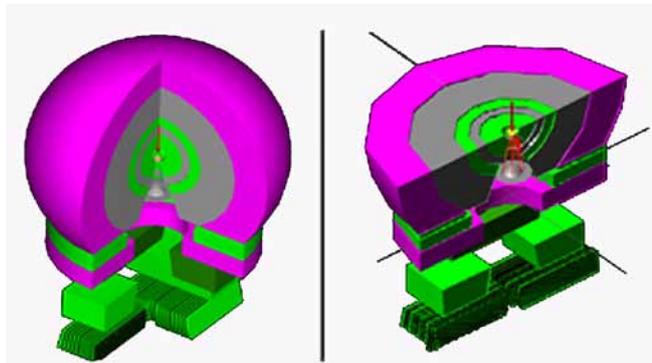


Fig 1. Corte do cabeçote do acelerador linear modelado (Rebello et al, 2010).

Posteriormente, realizou-se uma nova modelagem, semelhante à anterior, desconsiderando-se, desta vez, a existência das paredes, piso e teto. Foram calculados os novos valores de doses equivalentes nos mesmos órgãos/tecidos e da dose efetiva. Pela diferença dos valores obtidos, foi possível avaliar os efeitos decorrentes da blindagem sobre as doses equivalentes e efetiva no paciente. As Figuras 2 e 3 apresentam uma vista em planta e em corte da sala de radioterapia modelada, podendo-se observar a constituição de concreto das paredes, piso e teto.

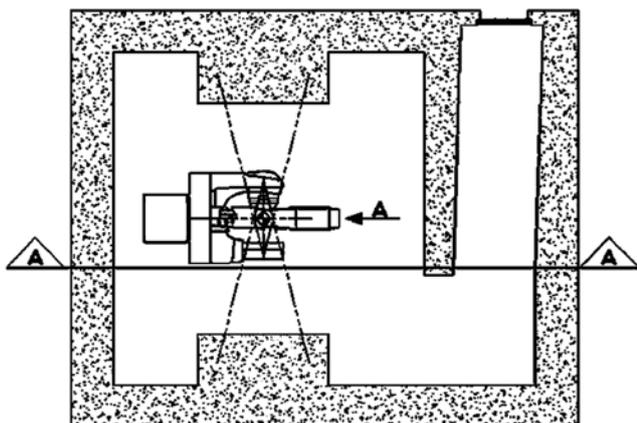


Fig 2. Planta baixa da sala de radioterapia modelada (Rebello et al, 2010).

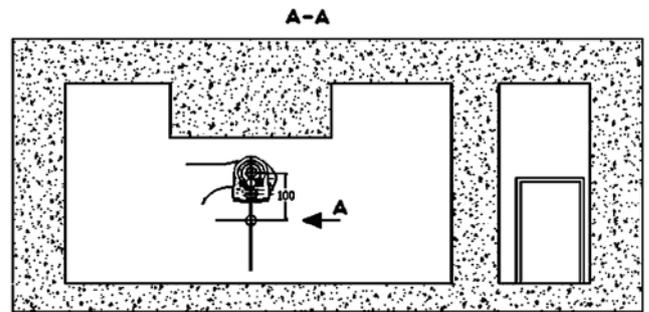


Fig 3. Corte da sala de radioterapia modelada, mostrando paredes, piso e teto.

As simulações foram feitas com o acelerador linear operando em quatro ângulos de inclinação do *gantry* ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ). As quatro posições do *gantry* estão representadas na Figura 4 e o posicionamento da próstata no isocentro ilustrado na Figura 5. Foram calculadas as doses equivalentes devido a fótons e nêutrons nas situações com e sem blindagem de concreto, para cada ângulo.

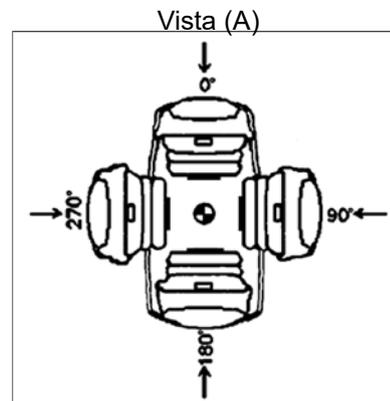


Fig 4. Vista (A) dos quatro ângulos do *gantry*.

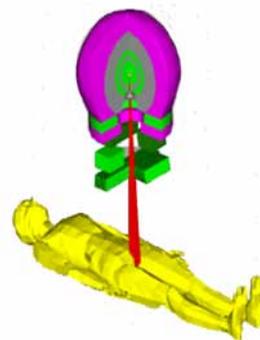


Fig 5. Ilustração do posicionamento da próstata no isocentro. O ser humano em amarelo é uma ilustração representativa do fantoma MAX, não correspondendo ao fantoma simulado (Thalhofer, 2011). Os vóxeis do fantoma não contribuem para a geração de imagem 3D.

Para os cálculos de dose equivalente e dose efetiva, foram utilizados os parâmetros de peso da radiação e peso dos órgãos e tecidos descritos pela ICRP em sua publicação nº 103 (2007). Os valores por ângulo da dose equivalente devido a fótons e nêutrons foram normalizados para cada 1Gy de dose devido a fótons na próstata. Aproximadamente 600 milhões e 2 bilhões de histórias foram usadas em cada

simulação para fótons e nêutrons, respectivamente, para que os cálculos mantivessem erros relativos abaixo de 5% para órgãos/tecidos próximos à região de tratamento, e de 10% para a maioria dos órgãos/tecidos afastados.

Numa segunda etapa do trabalho, foram calculados os fatores de risco para câncer secundário associados a exposições a baixas doses ( $\leq 100\text{mSv}$ ) nas situações com e sem blindagem de concreto, conforme modelo de risco BEIR VII. Pela diferença dos valores obtidos nas duas situações, foi possível avaliar os efeitos da blindagem sobre o risco de desenvolvimento de câncer secundário radioinduzido.

Somente órgãos/tecidos fora do feixe primário foram considerados, dada a limitação do modelo de risco de  $100\text{mSv}$  por exposição única. O BEIR VII apresenta fatores de risco (risco atribuível ao tempo de vida, LAR) de incidência de câncer em função da idade, do sexo (gênero) e do órgão ou tecido considerado, obtidos a partir da combinação dos modelos de excesso de risco absoluto (EAR) e de excesso de risco relativo (ERR), para cada 100 mil indivíduos expostos a uma dose única de  $0,1\text{Gy}$ , e corrigidos pelo fator de eficácia da dose e taxa de dose (DDREF) de 1,5.

Para estimativa dos riscos, as doses equivalentes dos órgãos/tecidos considerados obtidas nas modelagens com e sem blindagem foram multiplicadas pelos fatores de risco para homens, fornecidos pelo BEIR VII, a partir de uma regra de três simples. As parcelas das doses equivalentes devido a nêutrons foram multiplicadas por 1,5 para anular a correção do fator DDREF, uma vez que somente contribuições devido a radiações de baixo LET

são corrigidas (Bednarz *et al*, 2010).

Foram consideradas as idades de 40, 50, 60, 70 e 80 anos, já que, a Sociedade Brasileira de Urologia (SBU) recomenda aos homens acima de 50 anos e aos que têm 40 anos, com histórico familiar de câncer de próstata, irem anualmente ao urologista para fazer *check-up* da próstata, mesmo sem sintomas urinários (Gomes *et al*, 2008).

Para melhor interpretação dos resultados obtidos, os riscos calculados foram comparados com a linha definida pela taxa de incidência de câncer em determinados órgãos, para cada 100 mil habitantes do Brasil como um todo, conforme estimativa do INCA para o biênio 2014/2015. Os riscos obtidos também foram comparados com dados descritos na literatura.

Para permitir a comparação gráfica, tendo em vista as variações numéricas da ordem de até  $10^4$ , todos os resultados encontrados neste trabalho foram representados em escala logarítmica.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 6 e 7 e a Tabela 1 apresentam os valores das doses equivalentes encontradas para diversos órgãos/tecidos. Já a Tabela 2 e a Figura 8 apresentam as doses efetivas no indivíduo. Todas elas mostram resultados nas situações com e sem blindagem, bem como as respectivas contribuições da blindagem de concreto para as doses depositadas no paciente.

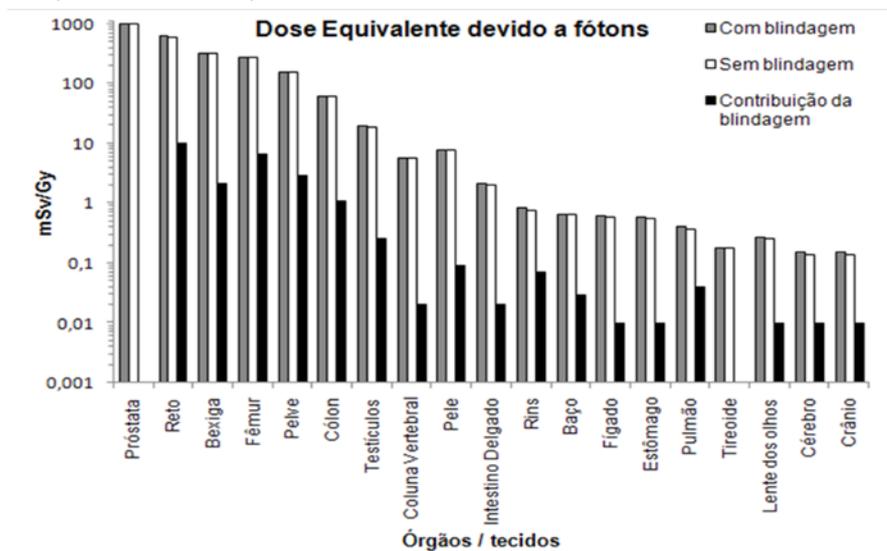


Fig 6. Contribuição da blindagem na dose equivalente devido a fótons.

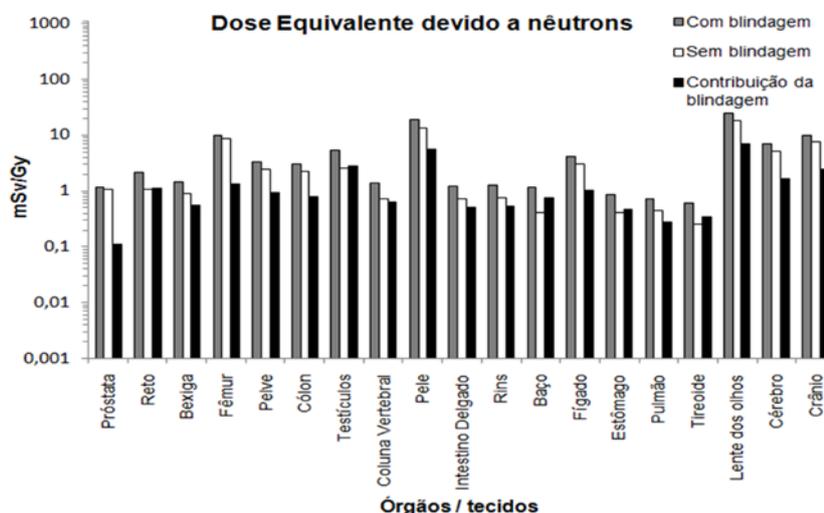


Fig 7. Contribuição da blindagem na dose equivalente devido a nêutrons.

**Tab 1.** Contribuição total da blindagem devido a fótons e nêutrons.

Órgãos / tecidos	Dose Equivalente Total Normalizada (mSv/Gy)		Contribuição total da blindagem	
	COM blindagem	SEM blindagem	mSv/Gy	%
Gl. Adrenais	1,34	0,61	0,73	54,48
Bexiga	328,48	325,78	2,7	0,82
Cérebro	6,96	5,27	1,69	24,28
Cólon	65,65	63,77	1,88	2,86
Lente dos olhos	25,25	18,2	7,05	27,92
Rins	2,13	1,53	0,6	28,17
Fígado	4,67	3,65	1,02	21,84
Pulmão	1,14	0,82	0,32	28,07
Esôfago	1,63	1,02	0,61	37,42
Pâncreas	1,47	1,22	0,25	17,01
Intestino Delgado	3,31	2,79	0,52	15,71
Pele	26,85	21,26	5,59	20,82
Baço	1,81	1,04	0,77	42,54
Estômago	1,45	0,97	0,48	33,10
Testículos	24,91	21,86	3,05	12,24
Timo	1,29	0,83	0,46	35,66
Tireoide	0,78	0,43	0,35	44,87
Traqueia	1,61	0,83	0,78	48,45
Esqueleto médio	51,18	48,5	2,68	5,24
Úmero	7,88	6,05	1,83	23,22
Região Torácica	4,1	2,79	1,31	31,95
Coluna Vertebral	7,16	6,5	0,66	9,22
Mandíbula	10,56	8,75	1,81	17,14
Crânio	10,05	7,57	2,48	24,68
Pelve	161,31	157,43	3,88	2,41
Fêmur	293,12	284,93	8,19	2,79
Osso inf. da perna	8,2	6,4	1,8	21,95
Tíbia e fíbula	15,06	11,47	3,59	23,84
Restante	34,75	32,21	2,54	7,31
Adiposo	39,93	36,85	3,08	7,71
Músculo	35,33	32,93	2,4	6,79
Cartilagens	18,12	14,16	3,96	21,85
Próstata	1001,16	1001,05	0,11	0,01
Reto	629,3	617,87	11,43	1,82
Intestino Grosso	4,42	4,58	-0,16	-3,62
Percentual Médio				20,02

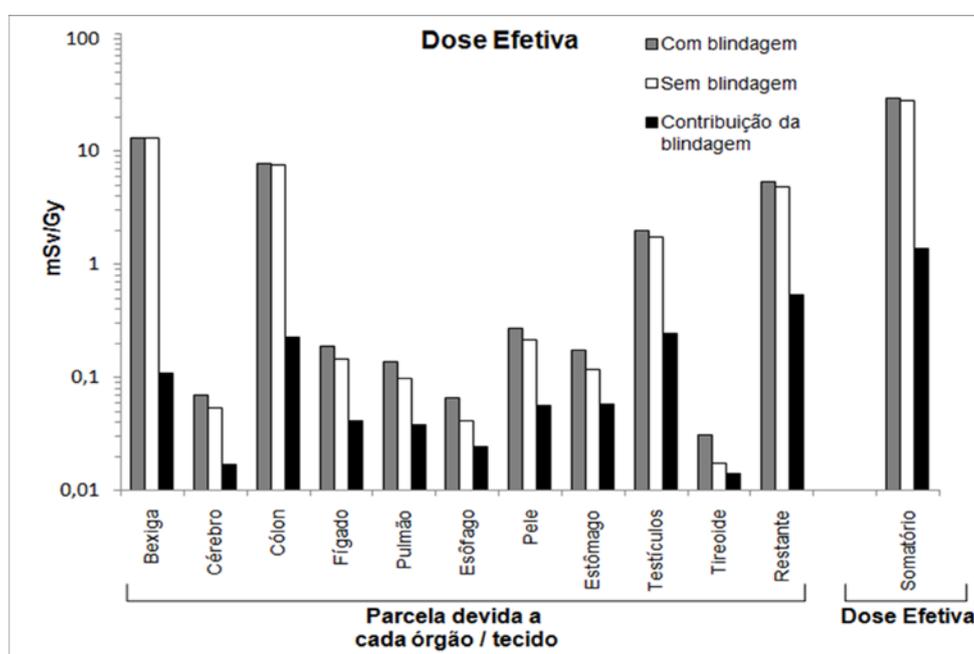
É possível observar que, para fótons, a contribuição da blindagem na dose equivalente no órgão/tecido é menor conforme este se localize em posição mais afastada do isocentro. Diferentemente, a contribuição na dose devido aos nêutrons ocorre com maior homogeneidade ao longo do corpo uma vez que a emissão de nêutrons não tem direção definida. Observa-se também que, para os órgãos/tecidos próximos ao isocentro, a contribuição da blindagem devido a fótons na

dose equivalente é maior do que a devido a nêutrons. Para órgãos/tecidos afastados do isocentro, a contribuição devido aos nêutrons se torna mais significativa do que a devido a fótons por um fator 10.

A contribuição negativa obtida para o intestino grosso, conforme a Tabela 1, é atribuída ao erro relativo alto para a dose devido a nêutrons calculada naquele órgão.

**Tab 2.** Dose efetiva e suas parcelas nas situações com e sem blindagem.

Órgãos / tecidos	Cálculo da Dose Efetiva (mSv/Gy)					
	COM blindagem			SEM blindagem		
	E <sub>fótons</sub>	E <sub>nêutrons</sub>	E <sub>Total</sub>	E <sub>fótons</sub>	E <sub>nêutrons</sub>	E <sub>Total</sub>
Bexiga	13,0815	0,0574	13,1389	12,9954	0,0354	13,0308
Cérebro	0,0015	0,0681	0,0696	0,0014	0,0513	0,0527
Cólon	7,5148	0,3638	7,8786	7,3836	0,2685	7,6521
Fígado	0,0246	0,1626	0,1872	0,0238	0,1221	0,1459
Pulmão	0,0486	0,0877	0,1363	0,0439	0,0540	0,0979
Esôfago	0,0170	0,0486	0,0656	0,0158	0,0253	0,0411
Pele	0,0795	0,1890	0,2685	0,0786	0,1340	0,2126
Estômago	0,0702	0,1044	0,1746	0,0688	0,0485	0,1173
Testículos	1,5656	0,4272	1,9928	1,5446	0,2040	1,7486
Tireóide	0,0072	0,0239	0,0311	0,0072	0,0100	0,0172
Restante	3,9836	1,4721	5,4557	3,9136	1,0016	4,9152
Somatório	26,3941	3,0048	29,3989	26,0768	1,9547	28,0315
Percentual	89,8%	10,2%	100%	93%	7%	100%
Dose Efetiva (mSv/Gy)	29,3989			28,0315		



**Fig 8.** Contribuição da blindagem de concreto para a dose efetiva no paciente.

**Tab 3.** Contribuição da blindagem na dose efetiva, por tipo de radiação.

Órgãos / tecidos	Contribuição da blindagem (mSv/Gy)		Contribuição total da blindagem (mSv/Gy)
	devido a Fótons	devido a Nêutrons	
Bexiga	0,0861	0,022	0,1081
Cérebro	0,0001	0,0168	0,0169
Cólon	0,1312	0,0953	0,2265
Fígado	0,0008	0,0405	0,0413
Pulmão	0,0047	0,0337	0,0384
Esôfago	0,0012	0,0233	0,0245
Pele	0,0009	0,055	0,0559
Estômago	0,0014	0,0559	0,0573
Testículos	0,021	0,2232	0,2442
Tireóide	0	0,0139	0,0139
Restante	0,07	0,4705	0,5405
Somatório	0,3173	1,0501	1,3674
Percentual	23,2%	76,8%	100%
Percentual na composição da Dose Efetiva			4,65%

Na Tabela 3, encontram-se as contribuições da blindagem de concreto na dose efetiva, por tipo de radiação presente, bem como seus percentuais de composição na contribuição e na dose. Observa-se que, em um tratamento radio-terápico para câncer de próstata de 74 Gy de dose terapêutica total, conforme preconizado pelo INCA, o concreto contribui com 101,19 mSv de dose efetiva, ou seja, 4,65% da dose efetiva no paciente (dos quais, 76,8% devido a nêutrons), sendo um valor muito superior em relação ao 1 mSv/ano permitido para indivíduos do público.

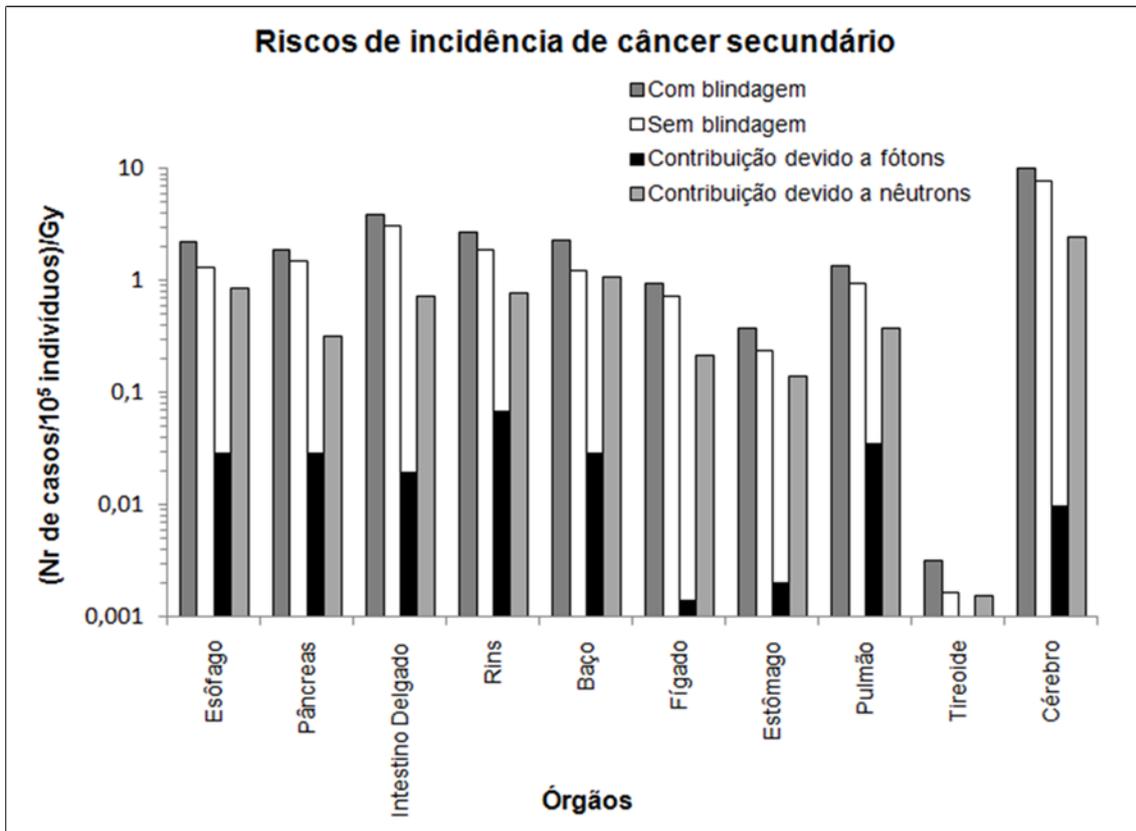
A Tabela 4 apresenta a contribuição da blindagem para os riscos de incidência de câncer secundário em diversos órgãos/tecidos por idade de exposição, bem como seus respec-

tivos percentuais de contribuição médios. Observa-se que, no geral, a blindagem contribui com cerca de 27% do risco para desenvolvimento de câncer secundário radioinduzido. Os valores negativos de contribuição encontrados para o intestino grosso são atribuídos ao alto erro relativo para a dose devido a nêutrons calculada naquele órgão. Os valores iguais a zero para a tireoide, na verdade foram menores que 0,005.

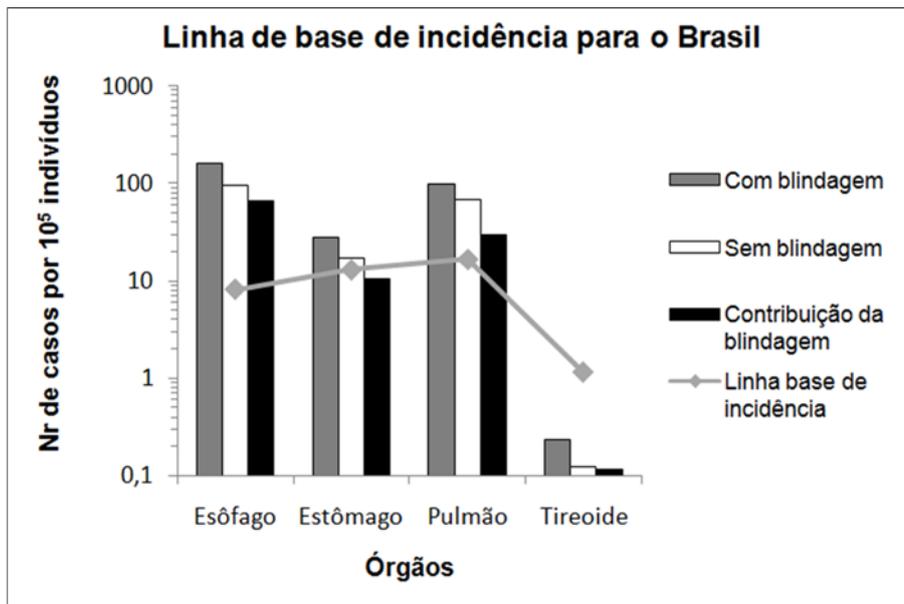
Os riscos de incidência de câncer secundário em alguns órgãos/tecidos são apresentados na Figura 9, bem como as respectivas contribuições da blindagem devido a fótons e nêutrons, para idade de exposição de referência de 60 anos. É possível observar que, para os órgãos/tecidos fora do feixe primário da radiação, a contribuição da blindagem para os riscos é, no mínimo, 10 vezes maior devido a nêutrons quando comparada à contribuição devido a fótons.

**Tab 4.** Percentuais de contribuição para os riscos por idade de exposição.

Órgão / tecido	Contribuição da blindagem (Nr de casos/10 <sup>5</sup> indivíduos)/Gv					Percentual de contribuição por idade de exposição (%)
	Idade de exposição (anos)					
	40	50	60	70	80	
Gl. Adrenais	1,87	1,52	1,06	0,62	0,25	60,78
Testículos	7,65	6,22	4,36	2,53	1,02	16,12
Esôfago	1,54	1,26	0,88	0,51	0,20	40,27
Pâncreas	0,62	0,51	0,36	0,21	0,08	18,90
Coluna Vertebral	1,68	1,38	0,96	0,56	0,22	12,50
Pele	14,35	11,68	8,17	4,75	1,92	22,98
Intestino Grosso	-0,50	-0,42	-0,29	-0,17	-0,07	-5,68
Intestino Delgado	1,32	1,08	0,76	0,44	0,18	19,67
Rins	1,48	1,21	0,84	0,49	0,20	31,23
Timo	1,19	0,96	0,67	0,39	0,16	37,70
Baço	1,96	1,59	1,11	0,65	0,26	47,90
Traqueia	2,00	1,63	1,14	0,66	0,27	50,54
Úmero	4,69	3,81	2,67	1,55	0,62	23,63
Região Torácica	3,37	2,74	1,92	1,12	0,45	33,33
Fígado	0,32	0,29	0,22	0,13	0,04	22,76
Estômago	0,19	0,18	0,15	0,1	0,05	37,93
Pulmão	0,48	0,46	0,41	0,3	0,15	30,56
Lente dos olhos	18,18	14,8	10,36	6,02	2,43	28,01
Cartilagens	10,21	8,31	5,81	3,39	1,36	21,93
Osso inf. da perna	4,63	3,76	2,63	1,53	0,61	22,87
Tíbia e fíbula	9,25	7,53	5,28	3,06	1,23	23,92
Restante	6,25	5,09	3,56	2,07	0,83	9,43
Adiposo	7,73	6,29	4,4	2,56	1,03	10,06
Músculo	5,83	4,75	3,32	1,94	0,78	8,73
Tireoide	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	48,61
Cérebro	4,35	3,54	2,48	1,44	0,58	24,41
Crânio	6,39	5,2	3,64	2,12	0,85	24,77
Percentual Médio						26,81



**Fig 9.** Riscos de incidência de câncer secundário em alguns órgãos, e respectivas contribuições da blindagem devido a fótons e nêutrons, para idade de exposição de 60 anos.



**Figura 10.** Comparação dos riscos calculados com a linha base de incidência para o Brasil, considerando 74Gy de dose terapêutica e idade de exposição de 60 anos.

Quando são comparados os riscos calculados para o protocolo de tratamento de 74Gy de dose terapêutica com a linha base de incidência de cânceres estimada pelo INCA para o biênio 2014/2015 no Brasil (INCA, 2014), conforme Figura 10, observa-se que aqueles estão bem acima desta, evidenciando o excesso previsto nos modelos de excesso de risco, risco relativo e absoluto, adotados pelo BEIR VII. Diferentemente da metodologia utilizada pelo BEIR VII, a estimativa de incidência feita pelo INCA não faz distinção de idade, logo o excesso observado pode ser ainda maior. Como na Figura 10 só constam os dados para a idade de exposição de 60 anos, o número de novos casos de câncer na tireoide fi-

cou abaixo da linha base. Entretanto, somando a contribuição das outras idades de exposição, o gráfico supera a linha base. A linha base de incidência é definida pela taxa de incidência de câncer em órgão específico, por 100 mil habitantes de uma determinada região, por sexo, mas sem considerar casos de cânceres secundários radioinduzidos.

Os órgãos/tecidos estudados que estão fora do feixe primário do tratamento, foram considerados aqueles destacados pelo INCA pela magnitude da mortalidade ou da incidência, ou por aspectos ligados ao custo e efetividade de programas de prevenção.

Os riscos obtidos neste trabalho também foram compara-

dos (Tabela 5) com dados descritos na literatura por Bednarz *et al* (2010), estimados para idade de exposição de 60 anos. Bednarz e colaboradores modelaram o acelerador Varian Clinac 2100C (mesmo modelo utilizado no presente trabalho) e um fantoma computacional realístico masculino adulto definido em malhas triangulares, o RPI-AM, mas sem considerar a blindagem de concreto da sala.

Observa-se que, com exceção dos riscos encontrados para o esôfago, o fígado e o cérebro, todos os outros apresentaram uma boa concordância quando comparados com os valores calculados com blindagem, embora a modelagem feita por Bednarz *et al* (2009) não incluía paredes, piso nem teto da sala de radioterapia. Tais divergências podem ser explicadas pelos diferentes fantasmas utilizados, bem como pelos diferentes números de histórias simuladas. Bednarz e colaboradores (2009) calcularam um total de 10 milhões de histórias para todas as simulações, enquanto que, para este trabalho, foram necessárias, aproximadamente, 600 milhões e 2 bilhões de histórias respectivamente em cada simulação para fótons e nêutrons.

**Tab 5.** Comparação dos riscos calculados com os dados descritos na literatura, por Bednarz e colaboradores (2010), para idade de exposição de 60 anos.

Órgão / tecido	Riscos para Órgãos / tecidos Específicos (Nr de casos por 10 <sup>5</sup> indivíduos)/Gy		Bednarz <i>et al</i>
	Calculado		
	Com blindagem	Sem blindagem	
Esôfago	2,19	1,31	0,77
Pâncreas	1,87	1,51	1,97
Rins	2,71	1,87	3,05
Baço	2,33	1,22	2,16
Fígado	0,94	0,72	0,26
Estômago	0,38	0,23	0,36
Pulmão	1,34	0,93	1,35
Tireoide	0,003	0,002	0,005
Cérebro	10,16	7,68	0,99

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam que a blindagem de concreto da sala de radioterapia tem contribuição média da ordem de 20% na dose equivalente depositada nos órgãos/tecidos, de 4,65% na dose efetiva no indivíduo e de 26,81% no risco de incidência de câncer secundário. Com estes dados é possível concluir que a blindagem da sala de radioterapia contribui de forma significativa para as doses equivalentes nos órgãos/tecidos, principalmente naqueles mais afastados do feixe primário, para a dose efetiva sobre o indivíduo e para o risco do paciente, em tratamento, desenvolver câncer secundário radioinduzido. Tais contribuições se devem, mais

expressivamente, às doses devidas aos nêutrons gerados no cabeçote e que são espalhados e/ou produzidos nas paredes, piso e teto (Silva, 2014). Os resultados aqui apresentados indicam, preliminarmente, que essas doses sobre o paciente não deveriam ser desconsideradas nas metodologias de cálculo da blindagem da sala, sugerindo-se estudos relacionados ao uso de materiais que reduzam seus efeitos negativos. Com isso, espera-se contribuir de forma importante para adicionar segurança aos procedimentos de radioproteção, controle ambiental e redução de efeitos secundários do tratamento oncológico com radioterapia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Biological Effects of Ionizing Radiation VII (BEIR VII), Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase 2. National Academy of Science, Washington, DC, 2006.
- [2] Cordeiro, T. P. V.; Coeficientes de Conversão para a Dose Efetiva e Equivalente de Dose Ambiente para Feixes de Raio X Utilizados em Radioterapia; Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [3] Facure, A., Silva, A. X. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design. *Applied Radiation and Isotopes*, 65, 1023-1028, 2007.
- [4] Frota, M. A., Crispim, V. R., Silva, A. X., Kelecom, A. Spectrally average conversion coefficients for air kerma to ambient dose equivalent for clinical linear accelerator. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 74-177, 2009.
- [5] International Commission on Radiological Protection, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, New Your, Pergamon Press, Oxford, 2007.
- [6] Kase, K. R., Nelson, W. R., Fasso, A., Liu, J. C., Mao, X., Jenkins, T. M., Kleck, J. H. Measurements of accelerator-produced leakage neutron and photon transmission through concrete. *Health Physics*, 84 (2), 180-187, 2003.
- [7] Kramer, R., Vieira, J. W., Khoury, H. J., Lima, F. R. A., Fuelle, D. All about MAX: a male adult voxel phantom for Monte Carlo calculations in radiation protection dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, 48, 1239-1262, 2003.
- [8] Mesbah, A., Azarpeyvand, A., Khosravi, H. R. Does concrete composition affect photoneutron production inside radiation therapy bunkers? *Japanese Journal of Radiology*, 30(2), p.162-166, 2012.
- [9] Rebello, W. F., Roque, H. S., Sandrini, E. S., Silva, M. G., Silva, A. X., Thalhofer, J. L. Comparison, Using Monte Carlo, of the Influence of Dose Due to Neutrons at the Patient Considering the Use of Lead or Steel Shielding on the Inner Walls of Radiotherapy Rooms. 12th International Symposium on Radiation Physics, 2012.
- [10] Rebello, W. F., Silva, A. X., Facure, A. Multileaf Shielding Design Against Neutrons Produced By Medical Linear Accelerators. *Radiation Protection Dosimetry*, 128(2), p.227-233, 2008.
- [11] Rebello, W. F., Silva, A. X., Facure, A., Silva, H. R. Monte Carlo simulation of photoneutrons streaming inside radiotherapy treatment rooms as a function of gantry angles. *Progress in Nuclear Energy*, 52, p.278-281, 2010.
- [12] Silva, M. G.; Comparação, Usando Simulação em Monte Carlo, da Influência das Doses Devido a Nêutrons em Pacientes, Considerando-se a Utilização de uma Blindagem Adicional de Chumbo ou Aço nas Paredes Internas da Sala de Radioterapia; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [13] Thalhofer, J. L.; Cálculo de Doses em Órgãos Sádios no Tratamento Radioterápico para Próstata, Utilizando Modelagem Computacional e Fantoma em Voxel; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.