

CÁLCULO DE PARÂMETROS DE UM EXPERIMENTO DE BLINDAGEM
E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO UTILIZADA

Sérgio Gavazza (IME)
Arthur C. Otto (IME)
Itacil C. Gomes (IME)
José R. Maiorino (IPEN/CNEN-SP)

RESUMO

Neste trabalho é realizada a avaliação de uma metodologia de cálculo de transporte de radiação, comparando-se as taxas de reação e de dose calculadas, para nêutrons e raios gama, com as medidas experimentais obtidas numa blindagem de ferro, irradiada no reator YAYOI. Empregou-se as bibliotecas ENDF/B-IV e VITAMIN-C e o sistema modular AMPX-II para geração de seções de choque e fatores de dose, condensados através do código ANISN. Os cálculos de transporte foram feitos com o código DOT 3.5, ajustando-se o espectro da fonte de contorno da blindagem de ferro pelas taxas de reação e dose, medidas no início da blindagem. As distribuições calculadas para nêutrons e raios gama, na blindagem de ferro, apresentaram coerência com as medidas experimentais.

ABSTRACT

In this text is carried out the evaluation of radiation transport methodology, comparing the calculated reactions and dose rates, for neutrons and gamma-rays, with the experimental measurements obtained on iron shield, irradiated in YAYOI reactor. Were employed the ENDF/B-IV and VITAMIN-C libraries and the AMPX-II modular system for generation of cross sections, collapsed by the ANISN code. The transport calculations were made by using the DOT 3.5 code, adjusting the spectrum of the iron shield boundary source to the reactions and dose rates, measured at the beginning of shield. The distributions calculated for neutrons and gamma-rays, on iron shield, presented coherence with the experimental measurements.

INTRODUÇÃO

O cálculo da penetração e distribuição de nêutrons e raios gama de um sistema nuclear é feito em três fases distintas. A primeira fase consiste na obtenção das seções de choque microscópicas, para as interações de nêutrons e raios gama com os vários materiais do sistema, a partir das bibliotecas de dados nucleares básicos. Na segunda fase as seções de choque são processadas convenientemente para serem empregadas pelos códigos. As distribuições dos fluxos de nêutrons e raios gama, num certo meio, e para uma determinada geometria, são calculadas na terceira fase, empregando-se um código nuclear para transporte de radiação. Essas três fases caracterizam uma metodologia de cálculo de blindagem.

A confiabilidade de uma metodologia de cálculo depende dos resultados que consegue reproduzir. Os padrões experimentais de blindagem permitem comparações entre dados teóricos e experimentais, podendo-se calcular um valor medido e testar a metodologia de cálculo utilizada. Assim, o objetivo desse trabalho é avaliar a metodologia apresentada na Figura 1, empregando-a na reprodução de parâmetros do experimento YAYOI[1].

O EXPERIMENTO YAYOI

O experimento YAYOI é um padrão experimental de blindagem destinado a medir as penetrações de nêutrons e raios gama em placas de ferro, utilizando o reator rápido YAYOI[2], operando na potência de 2,0 quilowatts. A Figura 2 mostra uma vista esquemática do arranjo experimental. Os materiais, composições químicas e densidades atômicas das várias regiões constam da referência bibliográfica 2.

As taxas de reação para nêutrons foram determinadas com detectores de ativação, tipo folha e as taxas de dose para raios gama com dosímetros termoluminescentes, instalados no interior da blindagem de ferro. As medidas foram realizadas nas distâncias de 0, 10, 20, 30 e 40 centímetros da linha de centro, nas direções norte e leste, para as profundidades de 0, 20, 40 e 60 centímetros de blindagem. Os resultados experimentais para as taxas de reação do índio e ouro e para as taxas de dose para raios gama, medidas com dosímetros termoluminescentes de sulfato de cálcio são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

ANÁLISE DO EXPERIMENTO YAYOI

Na análise do experimento YAYOI buscou-se reproduzir os valores medidos para as taxas de reação do índio (Tabela 1) e do ouro (Tabela 2) e taxas de dose (Tabela 3), empregando-se a metodologia de cálculo de blindagem apresentada na Figura 1.

As seções de choque acopladas, com 100 grupos de nêutrons e 22 grupos de gamas, foram obtidas da biblioteca DLC-41/VITAMIN-C [3], com o sistema modular AMPX-II[4]. Para condensar as seções de cho-

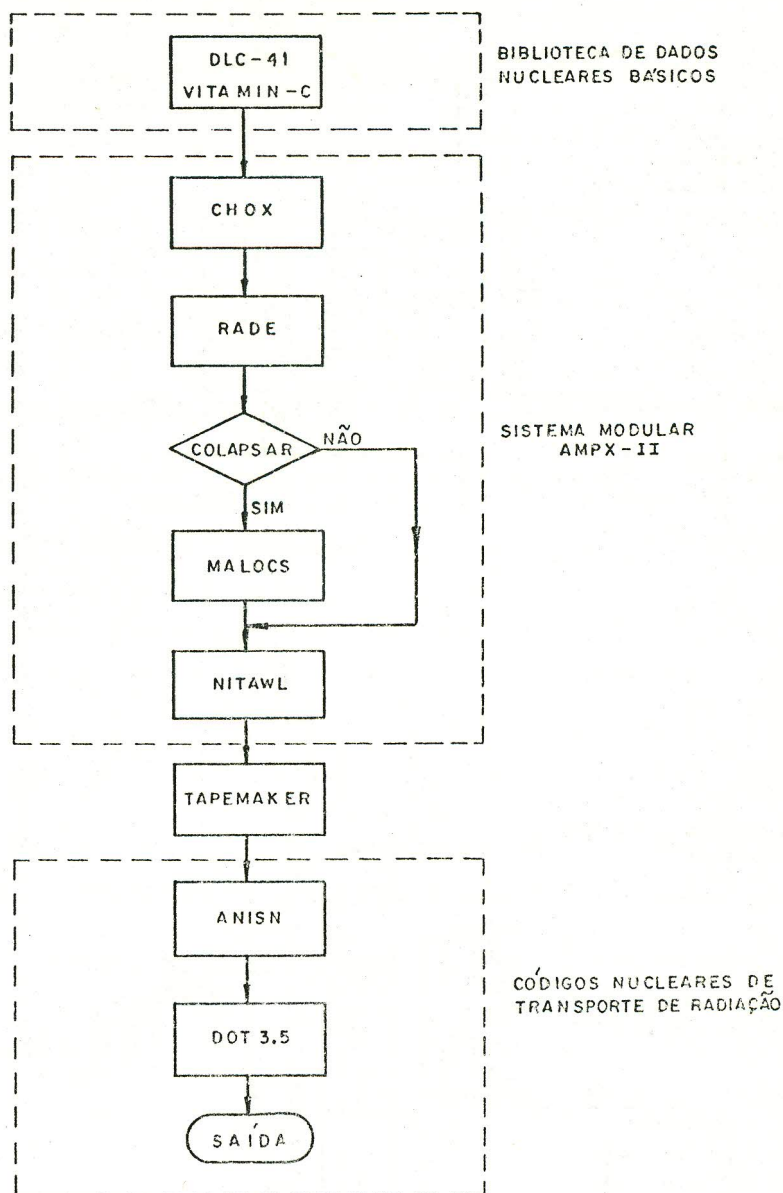
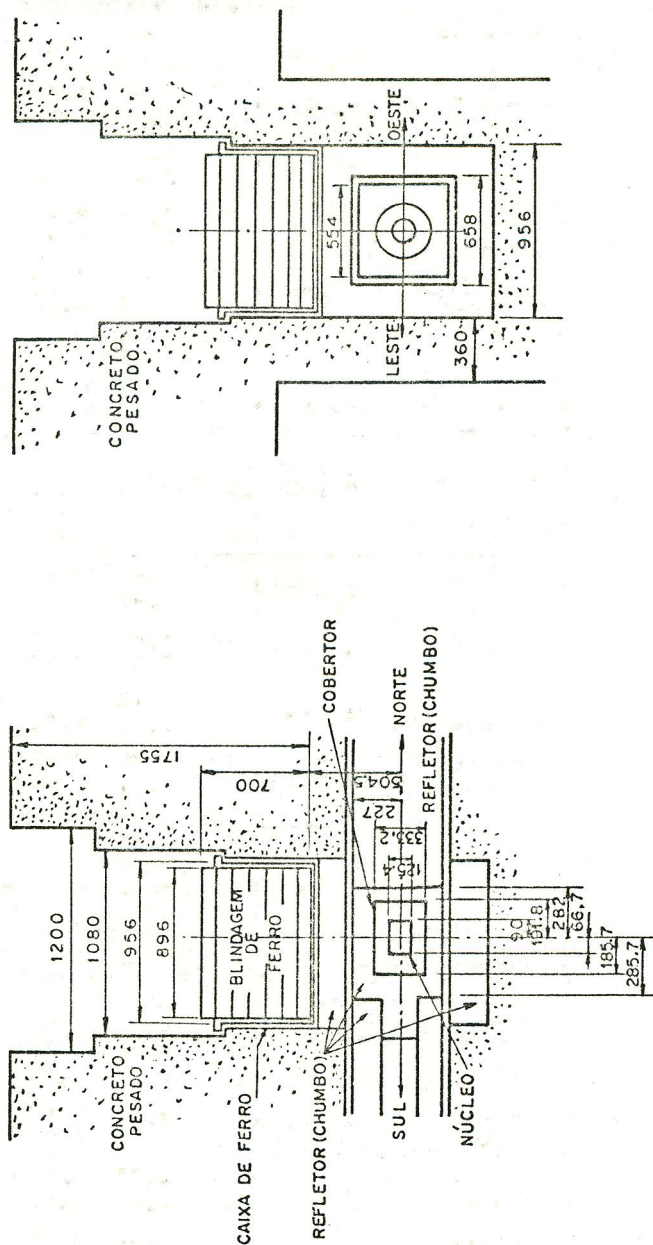


Figura 1. METODOLOGIA DE CÁLCULO DE BLINDAGEM



Figuro 2. VISTA ESQUEMÁTICA DO ARRANJO EXPERIMENTAL (Dimensões em milímetros)

Tabela 1. Taxas de reação medidas para a reação $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$
(reações por segundo por núcleo alvo)

Profundidade na blindagem ferro (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)				
		0	10	20	30	40
0	Norte	$2,82 \times 10^{-17}$	2,57	1,84	1,05	0,54
	Leste		2,34	1,69	1,05	0,56
20	Norte	$2,21 \times 10^{-18}$	2,04	1,69	1,15	0,69
	Leste		2,01	1,56	1,14	0,61
40	Norte	$2,76 \times 10^{-19}$	2,78	2,11	1,68	1,05
	Leste		2,72	1,94	1,65	1,15
60	Norte	$4,28 \times 10^{-20}$	4,17	3,20	3,03	2,05
	Leste		3,68	2,83	2,47	1,90

Tabela 2. Taxas de reação medidas para a reação $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
(reações por segundo por núcleo alvo)

Profundidade na blindagem de ferro (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)				
		0	10	20	30	40
0	Norte	$1,04 \times 10^{-13}$	0,96	0,90	0,79	0,69
	Leste		0,98	0,88	0,73	0,60
20	Norte	$3,60 \times 10^{-14}$	3,41	3,01	2,14	1,92
	Leste		3,35	2,97	2,38	1,96
40	Norte	$1,18 \times 10^{-14}$	1,12	1,00	0,80	0,69
	Leste		1,08	1,00	0,80	0,71
60	Norte	$3,37 \times 10^{-15}$	3,29	2,78	2,31	1,80
	Leste		3,31	2,89	2,38	1,90

Tabela 3. Taxas de dose medidas para raios gama
(Gray/hora)

Profundidade na blindagem de ferro (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)				
		0	10	20	30	40
0	Norte	$1,95 \times 10^1$	1,94	1,80	1,50	1,80
	Leste		1,93	1,74	1,88	1,39
20	Norte	$5,79 \times 10^0$	5,60	4,60	4,07	3,95
	Leste		5,34	4,86	4,11	4,31
40	Norte	$1,85 \times 10^0$	1,75	1,57	1,20	1,40
	Leste		1,73	1,55	1,23	1,56
60	Norte	$5,13 \times 10^{-1}$	5,02	4,46	3,72	3,84
	Leste		4,91	4,53	3,68	3,81

que, na estrutura final de 13 grupos de nêutrons e 3 grupos de gamas, apresentada na Tabela 4, fez-se um cálculo de criticalidade com o código de transporte, Sn, unidimensional, ANISN[5], nas aproximações P₅-S₈. Utilizou-se o código de transporte, Sn, DOT 3.5 [6], nas aproximações P₁-S₈, para as análises bidimensionais.

Gerou-se os fatores de dose, para raios gama, com o programa DOSE, do sistema modular AMPX-II. As seções de choque para os detectores limiares foram obtidas na referência bibliográfica 2, com exceção das do ouro, geradas à partir da ENDF/B-IV[7] pelo AMPX-II, por não constarem do DLC-41/VITAMIN-C. As seções de choque de ativação dos detectores e os fatores de dose foram condensados de maneira idêntica às demais seções de choque.

As análises bidimensionais, com o DOT 3.5, foram feitas das seguintes maneiras:

Direção de cálculo norte

1. Adotou-se a geometria (R,Z).
2. Com um cálculo de criticalidade, determinou-se a fonte de contorno na superfície inferior da blindagem de ferro.
3. Corrigiu-se o espectro da fonte de contorno baseado nas respostas dos detectores e dosímetros e nos fluxos obtidos, com o cálculo de criticalidade, no início da blindagem de ferro.
4. Analisou-se a blindagem de ferro com as fontes de contorno sem correção e com correção.
5. Determinou-se as taxas de reação para o índio e o ouro e as taxas de dose para raios gama, nos vários pontos analisados, com os dois tipos de fontes de contorno.

Direção de cálculo leste

1. Adotou-se a geometria (X,Y).
2. Com um cálculo de criticalidade, determinou-se a fonte de contorno na superfície inferior da blindagem de ferro.
3. Analisou-se a blindagem de ferro com a fonte de contorno sem correção.
4. Corrigiu-se o espectro da fonte de contorno baseado nas respostas dos detectores e dosímetros, no início da blindagem de ferro, e nos fluxos obtidos, nessa mesma posição, na análise da blindagem de ferro com a fonte de contorno sem correção.
5. Analisou-se a blindagem de ferro com a fonte de contorno com correção.
6. Determinou-se as taxas de reação para o índio e o ouro e as taxas de dose para raios gama, nos vários pontos analisados, com os dois tipos de fontes de contorno.

Em ambas direções de cálculo, os espectros das fontes de contorno foram corrigidos para que as razões (C/E) entre as taxas de reação e de dose calculadas (C) e medidas experimentalmente (E), no início da blindagem, na linha de centro, fossem aproximadamente 1,0, conforme indicado na Tabela 5.

Os resultados obtidos para nêutrons e gamas são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8. Nessas tabelas, os valores entre parênteses correspondem aos erros percentuais verificados em relação aos valores medidos, constantes das Tabelas 1, 2 e 3. Para uma mesma profundidade, os valores medidos ou calculados, nas posições afastadas da linha de centro, possuem a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos na linha de centro.

CONCLUSÕES

A geometria (X,Y) é mais conservativa que a geometria (R,Z).

Obtem-se melhores resultados com a fonte de contorno corrigida. Os cálculos na direção leste, com fonte de contorno corrigida, produziram os menores erros, indicando que a técnica para correção da fonte, empregada nessa direção, deve ser a mais indicada.

Os resultados obtidos para as taxas de reação do índio e do ouro e taxas de dose para raios gama, mostrados nas Tabelas 6, 7 e 8, são coerentes com os valores experimentais, permitindo afirmar-se que a metodologia de cálculo empregada na análise do problema e indicada na Figura 1, é válida.

Os erros verificados podem ser atribuídos a vários fatores, nem sempre fáceis ou possíveis de serem quantificados. Numa análise desse tipo, as principais fontes de erros podem ser consequência de [8]:

- (i) incertezas nos dados da fonte,
- (ii) incertezas nos valores das seções de choque,
- (iii) imperfeições dos métodos de cálculo, mesmo em geometria ideal,
- (iv) geometrias complexas.

Os fatores de auto-blindagem de Bondarenko não foram utilizados no presente trabalho. A repetição dos cálculos, aplicando-se esses fatores às seções de choque microscópicas, em diluição infinita, poderia fornecer dados úteis para auxiliar na análise dos erros.

Medidas experimentais, quando disponíveis, devem ser empregadas para corrigir os fluxos e ajustar melhor os cálculos. Os problemas padrões experimentais permitiriam tais refinamentos nos cálculos.

Concluindo verifica-se que a comparação dos resultados teóricos com dados experimentais proporciona uma avaliação mais rea-

Tabela 4. Estrutura de grupos para a análise bidimensional

Grupo	Nêutrons		Raios gama	
	Limite superior de energia (eV)		Limite superior de energia (MeV)	
1	1,4918E+07 (a)		14,00	
2	6,7032E+06		5,00	
3	3,0119E+06		1,33 (c)	
4	1,1080E+06			
5	4,0762E+05			
6	1,4996E+05			
7	3,1828E+04			
8	1,1709E+04			
9	4,3074E+03			
10	1,5846E+03			
11	1,6702E+02			
12	8,3153E+00			
13	4,1399E-01 (b)			

(a) Leia-se como $1,4918 \times 10^7$.

(b) O limite inferior de energia é 0,001 eV.

(c) O limite inferior de energia é 0,02 MeV.

Tabela 5. Valores de C/E na linha de centro na superfície inferior da blindagem de ferro para as duas direções de cálculo

Tipo de Reação	Taxas de re ação e dose medidas	Fonte de contorno sem correção		Fonte de contorno com correção Norte e Leste
		Norte	Leste	
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	1,54E-20 (a)	0,678	1,612	0,721
$^{24}\text{Mg}(n,p)$	3,28E-20	0,824	1,963	0,986
$^{27}\text{Al}(n,p)$	7,20E-20	0,563	1,350	0,905
$^{58}\text{Ni}(n,p)$	2,99E-18	0,473	1,250	1,020
$^{115}\text{In}(n,n')$	2,82E-17	0,472	1,403	0,988
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	1,04E-13	1,344	4,806	0,997
$\text{CaSO}_4\text{-Tm}$	1,95E+01 (b)	0,751	2,500	0,999

(a) Leia-se como $1,54 \times 10^{-20}$ reações por segundo por núcleo alvo.

(b) Leia-se como $1,95 \times 10^1$ Gray por hora.

Tabela 6: Taxas de reação calculadas para a reação $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$
(reações por segundo por núcleo alvo)

Prof. Bldg (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)				
		0	10	20	30	40
		Fonte de contorno sem correção				
0	Norte	1,59E-17(-43,5)*	1,40(-45,7)	0,96(-47,9)	0,58(-44,6)	0,31(-42,2)
	Leste	3,96E-17(40,3)	3,57(52,4)	2,65(56,5)	1,67(58,8)	0,46(-16,7)
20	Norte	1,48E-18(-33,0)	1,37(-32,7)	1,08(-36,2)	0,76(-34,3)	1,60(132,0)
	Leste	4,51E-18(104,1)	4,19(108,6)	3,41(118,9)	2,40(110,8)	0,73(19,8)
40	Norte	1,05E-19(-61,9)	0,99(-64,3)	0,82(-60,9)	0,61(-63,7)	0,40(-62,3)
	Leste	3,63E-19(31,6)	3,41(25,5)	2,90(49,5)	2,11(28,0)	0,66(-42,9)
60	Norte	8,56E-21(-80,0)	8,11(-80,5)	6,89(-78,5)	5,22(-82,8)	3,49(-83,0)
	Leste	3,23E-20(-24,5)	3,08(-16,4)	2,62(-7,6)	1,97(-20,3)	0,61(-67,8)
Fonte de contorno com correção						
0	Norte	3,34E-17(18,6)	2,92(13,8)	1,97(7,3)	1,17(11,9)	0,61(13,5)
	Leste	2,80E-17(-0,9)	2,51(7,2)	1,83(8,4)	1,13(7,5)	0,31(-45,1)
20	Norte	2,55E-18(14,9)	2,35(15,1)	1,83(8,3)	1,26(9,5)	0,76(9,6)
	Leste	2,50E-18(13,1)	2,31(15,2)	1,87(19,7)	1,30(14,0)	0,40(-34,8)
40	Norte	1,69E-19(-38,9)	1,56(-43,8)	1,29(-38,9)	0,96(-43,0)	0,61(-41,7)
	Leste	1,83E-19(-33,5)	1,72(-36,7)	1,44(-25,5)	1,06(-35,8)	0,33(-71,3)
60	Norte	1,30E-20(-69,6)	1,24(-70,3)	1,05(-67,1)	0,80(-73,6)	0,53(-74,4)
	Leste	1,56E-20(-63,5)	1,48(-59,8)	1,26(-55,5)	0,94(-61,8)	0,30(-84,3)

* Leia-se $1,59 \times 10^{-17}$

Tabela 7: Taxas de reação calculadas para a reação $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$
(reações por segundo por núcleo alvo)

Prof. Bldg (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)				
		0 10 20 30 40				
		Fonte de contorno sem correção				
0	Norte	1,63E-13(56,7)*	1,61(68,4)	1,55(71,7)	1,46(84,0)	1,37(98,2)
	Leste	5,00E-13(380,6)	4,97(409,8)	4,97(461,7)	5,11(597,8)	7,00(1075,3)
20	Norte	7,66E-14(112,7)	7,31(114,3)	6,69(112,2)	5,09(137,8)	3,70(92,9)
	Leste	2,53E-13(600,9)	2,40(616,5)	2,08(601,7)	1,66(595,5)	1,80(816,8)
40	Norte	1,90E-14(60,9)	1,80(61,1)	1,56(56,5)	1,21(50,4)	0,84(23,1)
	Leste	6,16E-14(422,0)	5,84(441,0)	5,02(404,5)	3,89(385,3)	4,03(472,0)
60	Norte	3,23E-15(-4,2)	3,07(-6,7)	2,65(-4,7)	2,05(-11,1)	1,42(-21,2)
	Leste	1,03E-14(204,5)	0,97(194,3)	0,84(189,8)	0,65(172,4)	0,66(248,4)
Fonte de contorno com correção						
0	Norte	1,20E-13(15,4)	1,18(23,9)	1,17(29,6)	1,07(35,4)	1,01(46,1)
	Leste	1,05E-13(0,5)	1,04(6,5)	1,04(17,2)	1,06(45,2)	1,47(146,5)
20	Norte	6,33E-14(75,9)	6,04(77,1)	5,27(74,9)	4,19(95,8)	3,07(59,9)
	Leste	6,44E-14(78,9)	6,12(82,7)	5,29(78,2)	4,17(75,1)	4,85(147,5)
40	Norte	1,80E-14(52,5)	1,71(52,7)	1,48(48,5)	1,15(43,3)	0,82(18,9)
	Leste	1,89E-14(60,0)	1,79(65,9)	1,54(54,6)	1,19(48,3)	1,30(83,9)
60	Norte	3,34E-15(-0,8)	3,18(-3,3)	2,75(-1,0)	2,15(-7,1)	1,51(-16,3)
	Leste	3,44E-15(2,2)	3,27(-1,2)	2,81(-2,8)	2,17(-8,1)	2,31(21,8)

* Leia-se $1,63 \times 10^{-13}$

Tabela 8: Taxas de dose calculadas para raios gama
(Gray/hora)

Prof. Bldg (cm)	Direção	Distância da linha de centro (cm)			
		0			
		10	20	30	40
Fonte de contorno sem correção					
0	Norte	1,55(-20,0)	1,38(-23,2)	1,15(-23,2)	0,90(-50,1)
	Leste	4,65(141,1)	4,12(136,9)	3,44(82,8)	3,50(151,5)
20	Norte	5,85(4,6)	5,05(9,8)	3,93(-3,3)	2,72(-31,2)
	Leste	1,93(260,6)	1,65(239,3)	1,26(206,7)	1,01(135,1)
40	Norte	1,35(-17,1)	1,16(-26,2)	0,90(-25,0)	0,60(-57,1)
	Leste	4,55(163,2)	3,89(151,2)	2,96(140,3)	2,33(49,1)
60	Norte	2,22(-55,9)	1,91(-57,3)	1,47(-60,5)	1,00(-74,0)
	Leste	7,42(51,1)	6,37(40,7)	4,80(30,4)	3,94(3,1)
Fonte de contorno com correção					
0	Norte	1,50(-22,6)	1,33(-26,1)	1,10(-26,4)	0,86(-52,0)
	Leste	1,34(-30,7)	1,18(-32,1)	0,98(-47,7)	1,06(-24,0)
20	Norte	5,11(-8,7)	4,39(-4,5)	3,41(-16,2)	2,36(-40,3)
	Leste	5,17(-3,3)	4,41(-9,2)	3,36(-18,3)	2,77(-35,6)
40	Norte	1,35(-23,1)	1,16(-26,3)	0,89(-25,6)	0,61(-56,7)
	Leste	1,43(-17,3)	1,22(-21,1)	0,93(-24,6)	0,74(-52,6)
60	Norte	2,39(-52,3)	2,06(-53,8)	1,59(-57,2)	1,10(-71,4)
	Leste	2,55(-48,1)	2,19(-51,8)	1,65(-55,1)	1,36(-64,2)

* Leia-se $1,63 \times 10^1$

lista da metodologia de cálculo empregada. O estabelecimento de novos padrões experimentais possibilitariam a avaliação da metodologia de cálculo para outros tipos de materiais e modelos de blindagem.

REFERÊNCIAS

- [1] S.GAVAZZA, "Cálculo de Parâmetros de um Experimento de Blindagem", Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1986.
- [2] Y.OKA, S.AN, S.KASAI, S.MIYASAKA e K.KOYAMA, "Neutron and Gamma-Ray Penetrations in Thick Iron", Nucl.Sci.Eng., 73, 259-273, 1980.
- [3] R.W.ROUSSIN, C.R.WEISBIN, J.E.WHITE, N.M.GREENE e R.Q.WRIGHT, "DLC-41/VITAMIN-C: The CTR Processed Multigroup Cross-Section Library for Neutronics Studies, RSFC-37, ORNL, 1980.
- [4] N.M.GREENE, W.E.FORD III et al., "AMPX-II: A Modular Code System for Generating Coupled Multigroup Neutron - Gamma-Ray Cross-Section Libraries from Data in ENDF Format", TM-3706, ORNL, 1976 (Revised 1978).
- [5] W.W.ENGLE Jr., "Users Manual for ANISN: A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", RSIC-CCC-82, ORNL, 1967.
- [6] W.A.RHOADES, F.R.MYNATT, "The DOT 3.5 Two-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code", RSIC-CCC-276, ORNL, 1975.
- [7] O.GABBER, C.DUMFORD, S.PEARLSTEIN, "ENDF-102 - Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File", NCS-50496, BNL, 1975.
- [8] J.WOOD, "Computacional Methods in Reactor Shielding", Pergamon Press, 1982.