

Análise para cálculo de blindagem de cabana óptica para linha de luz do Sirius

Isabela Castro de Moraes¹, Fernanda do Nascimento Moura¹, Fernando Antonio Bacchim Neto¹

¹ Grupo de Proteção Radiológica, CNPEM

E-mail: isabela.moraes@lnls.br

Resumo: O trabalho descreve a análise para obtenção das espessuras de blindagem radiológica em aço e chumbo das paredes da cabana óptica de uma linha de luz do Sirius utilizando os códigos FLUKA e STAC8. Foram consideradas contribuições da radiação *gas bremsstrahlung* e radiação síncrotron. Obtivemos para a parede lateral à distância de 0,3, 1, 1,5 e 2 metros do feixe espessuras em mm de: 5,8, 4,6, 4,2 e 4,0 (chumbo) e 49,8, 41,0, 38,0 e 33,5 (aço), respectivamente. Para parede traseira, têm-se 50,8 (aço) ou 5 (chumbo) com reforço central de 50 cm² com 62 (aço) ou 9,4 (chumbo).

Palavras-chave: cálculo de blindagem, proteção radiológica, *gas bremsstrahlung*, radiação síncrotron, código Monte Carlo.

Abstract: This work describes the analysis for radiological shielding thickness of steel and lead for optics hutch walls for a beamline of Sirius using FLUKA and STAC8 codes. The contribution of gas bremsstrahlung and synchrotron radiation was considered. For side wall the thickness in mm at distance of 0.30 m, 1.0 m, 1.5 m and 2 m from beam were, respectively: 5.8, 4.6, 4.2 and 4.0 (lead) and 49.8, 41.0, 38.0 and 33.5 (steel). For downstream wall, the thickness obtained were 50.8 mm (steel) or 5 mm (lead) with a 50 cm² central reinforcement with 62 mm (steel) or 9.4 mm (lead).

Keywords: radiation shielding calculation, radiation protection, gas bremsstrahlung, synchrotron radiation, Monte Carlo code.

1. INTRODUÇÃO

Uma fonte de luz síncrotron, como o Sirius, é uma máquina composta por um feixe de elétrons que percorrem trajetórias aproximadamente circulares (anel) dentro de câmaras de ultra alto vácuo e que são constantemente acelerados. Esses elétrons que viajam em velocidades próximas à velocidade da luz ao serem desviados tangencialmente de sua trajetória, devido à presença de um campo magnético, produzem a luz, ou radiação, síncrotron. Ela é um tipo de radiação eletromagnética que se estende por uma faixa ampla do espectro, com fótons de energia desde o infravermelho até centenas de keV. Máquinas como esta funcionam como um grande microscópio capaz de revelar a estrutura molecular e atômica de diversos materiais graças a radiação síncrotron.

Durante todo esse processo também são produzidas radiações ionizantes secundárias, como fótons de alta energia, nêutrons e também *gas Bremsstrahlung*, que é proveniente da desaceleração do feixe devido a presença de moléculas de gás residual dentro das câmaras de ultra-alto vácuo. Por isso, ao redor desse anel temos como blindagem as paredes de concreto inteiriço para conter a radiação ali presente. No caso do Sirius, o feixe de elétrons possui energia de 3 GeV e corrente armazenada da ordem de 350 mA.



Figura 1: Representação da blindagem de concreto ao redor do acelerador e das linhas de luz. [7]

A radiação síncrotron é utilizada nas linhas de luz para a realização da análise de diversos materiais com diferentes técnicas. Assim, são necessárias blindagens para evitar a exposição das pessoas presentes no hall experimental, como usuários das linhas de luz e operadores. Para isso, são construídas estruturas que envolvem os elementos ópticos chamadas cabanas.

As primeiras cabanas de cada linha, posicionadas imediatamente após a blindagem de concreto são chamadas de cabanas ópticas. Elas recebem a maior quantidade de radiação proveniente do anel e são responsáveis por abrigar os primeiros elementos ópticos que iniciarão o processo de filtração do feixe, permitindo a passagem para as próximas estações apenas as energias de interesse. As demais cabanas são chamadas cabanas experimentais.

Esse trabalho descreve a análise necessária para obtenção das espessuras de blindagem radiológica das cabanas ópticas em aço e em chumbo utilizando duas ferramentas computacionais diferentes: um código de transporte de partículas, FLUKA [4] e um método analítico, STAC8 [1].

1.1. Premissas da proteção radiológica

O Sirius segue normas brasileiras de radioproteção instituídas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Ele está classificado no grupo 7, subgrupo 7D [3].

A CNEN estabelece que a dose limite para exposições para indivíduos do público é de 1 mSv/ano [2]. Considerando a estimativa de 2000h anuais de trabalho, valor adotado por normas internacionais, o valor de referência de taxa de dose adotado para cálculos é de $0,5 \mu\text{Sv}/h$. De acordo com uma boa prática internacional para instalações deste tipo, consideramos alguns fatores internos de segurança e sua redundância. Logo, adotamos como valores de referência de taxa de dose para radiação síncrotron $0,1 \mu\text{Sv}/h$ e para *gas bremsstrahlung* $0,25 \mu\text{Sv}/h$. Dado que a produção de *gas bremsstrahlung* é linearmente proporcional à pressão dentro das câmaras de vácuo e consideramos para os cálculos valores de pressão do pior cenário (100 vezes maiores do que a operação normal), adotamos valores de referência mais conservadores para esta contribuição.

1.4. O código FLUKA

FLUKA é um código Monte Carlo de transporte de partículas desenvolvido pelo CERN (*European Organization for Nuclear Research*) que apresenta diversas aplicações como design de blindagens, dosimetria, hadronterapia, física de partículas, design de detectores, etc [4].

Com uso de rotinas de usuários é possível importar parâmetros para as partículas iniciais a serem simuladas. Nos cálculos apresentados, simulamos a produção de *gas bremsstrahlung* reproduzindo o processo de interação dos elétrons com o gás residual; e, para radiação síncrotron, inserimos espectros em função da energia de fótons obtidos com o código SRW [6] pelo Grupo de Óptica do CNPEM. Para essas simulações, utilizamos o Supercomputador Santos Dumont localizado na sede do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC).

1.5. O código STAC8

Outro método de cálculo de blindagens utilizado é o código analítico STAC8 [1]. A grande vantagem desse tipo de código é a rapidez na obtenção de resultados, diferentemente de códigos Monte Carlo, como FLUKA, que demandam um esforço computacional significativo para a simulação de partículas suficientes para obtenção de uma boa estatística de erro.

Nas análises desse artigo foi utilizada a funcionalidade do STAC8 de entrada do espectro, os mesmo utilizados com o FLUKA, para a obtenção de dose. Este software não nos permite calcular a contribuição por *gas bremsstrahlung*, apenas luz síncrotron.

2. METODOLOGIA

Iremos analisar as espessuras necessárias para garantia de que externamente à cabana óptica não teremos doses acima do limite adotado para radiação síncrotron e *gas bremsstrahlung*. Com o FLUKA, esse estudo é feito analisando o decaimento da dose dentro da parede. Já com o STAC8, variamos a espessura do material até alcançarmos a dose limite. Para todos os cálculos apresentados nesse trabalho foi considerado um feixe de 3 GeV e a corrente máxima para a qual a máquina foi projetada, 500 mA.

Considerou-se também o feixe incidindo em um espalhador ideal, ou seja, aquele que proporciona o maior espalhamento possível para o ponto de interesse.

Além do fator geométrico de pior cenário possível de espalhamento, os resultados obtidos de dose equivalente para radiação síncrotron são dobrados, como um fator de segurança e fomentando o Princípio ALARA da Proteção Radiológica [2]. Para a linha de luz analisada nesse trabalho a radiação *gas bremsstrahlung* não possui contribuições expressivas quando comparada à síncrotron. Desta forma, nas simulações de *gas bremsstrahlung* apenas simulamos esta contribuição para garantir que de fato todas as doses estão abaixo dos limites estabelecidos.

2.1 Design das cabanas ópticas

As cabanas ópticas são formadas por uma parede lateral, uma parede traseira, teto e uma parede inclinada ligando a parede traseira à parede lateral mais distante da blindagem do anel. Um esquema simplista da cabana vista superiormente encontra-se na figura abaixo.

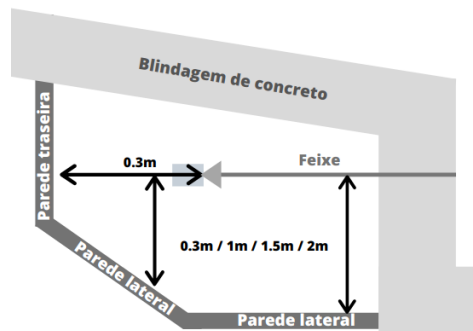


Figura 2: Esquema de uma cabana óptica onde vemos a representação do feixe atingindo um meio espalhador.

Serão analisadas as espessuras necessárias para quatro distâncias entre a parede e o feixe, são elas: 30 cm, 1 m, 1,5 m e 2,0 m. A parede inclinada possui uma espessura que varia em função da distância do feixe, em valores discretos, obtidos pela análise de espalhamento lateral. Já a parede traseira possui um furo central para a passagem do feixe e está perpendicular a ele. Analisou-se o cenário no qual ela está posicionada a 30 cm de um espalhador ideal.

Devido ao seu posicionamento, as paredes traseiras são mais espessas que as laterais. Como a espessura necessária diminui conforme nos afastamos da linha do feixe é possível a inclusão de um reforço na região em torno da saída do feixe, como na figura 5, para a adequação das espessuras necessárias.

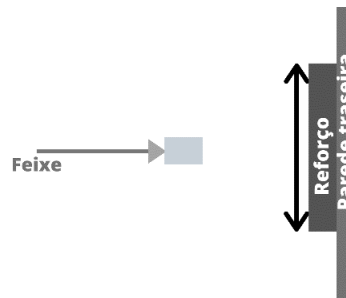


Figura 3: Esquema lateral do reforço utilizado na parede traseira da cabana óptica.

2.2 Espectros

No Sirius existem duas formas de obtenção do feixe de luz síncrotron. A primeira delas faz uso de um único ímã chamado dipolo que são responsáveis pela curvatura na trajetória dos elétrons, produzindo fótons tangencialmente ao anel. A segunda maneira é com o uso de dispositivos de inserção, conjunto de vários ímãs responsáveis por proporcionar ao feixe diversas pequenas curvas durante uma trajetória média retilínea [7].

A linha de luz aqui analisada utilizará a radiação síncrotron proveniente do ímã central, chamado de BC de 3,2 T, de um dos trechos curvos do anel. O primeiro espelho desta linha, chamado de M1, será posicionado dentro da blindagem do anel, ou seja, o espectro que chegará no hall experimental será o obtido após ser filtrado por este elemento. Parte da radiação que incide nele não é refletida, desta forma ocorre uma diminuição da intensidade do feixe após este elemento. Portanto, na análise de espessuras para o pior cenário possível para síncrotron da cabana óptica foi utilizado o espectro após M1.

Esse espelho possui cobertura de três materiais: Ródio (Rh), Platina (Pt) e Silício (Si). Desta forma, a cobertura refletiva do espelho que está sendo usada pode ser alterada durante a operação da linha, dentro destas três opções.

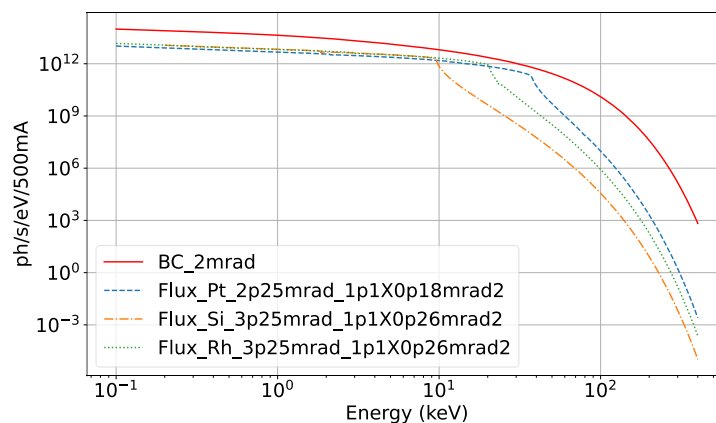


Figura 4: Espectro antes do M1 (linha contínua) e após M1 (linhas tracejadas) para espelho recoberto por platina (Pt, azul), silício (Si, laranja) e ródio (Rh, verde).

Da figura acima é possível notar que a presença de espelhos diminui consideravelmente a intensidade do feixe para energias mais altas, que são de maior contribuição para cálculos de blindagem já que quanto maior é a energia, mais penetrante é a partícula e maiores serão as espessuras necessárias para blindá-la. Comparando os três espectros após os espelhos, vemos que com a cobertura em platina há um maior fluxo para energias maiores que 10 keV. Portanto, esse foi o espectro escolhido para cálculos de blindagem para a cabana óptica desta linha.

2.3 Análise para radiação gas bremsstrahlung

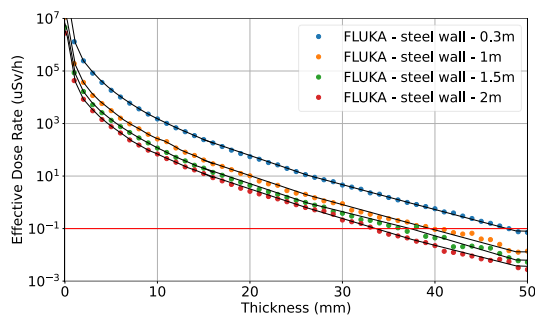
Por conservadorismo, o valor adotado para as análises foi de 1E-8mbar, aproximadamente, 100 vezes maior do que as pressões usuais de operação da máquina, conforme explicado anteriormente.

Com o FLUKA, avaliamos a contribuição de dose devido a radiação gas *Bremsstrahlung*. Simulamos a interação do feixe de elétrons com o gás residual dentro da câmara de vácuo do acelerador, com a inclusão dos elementos dentro da blindagem de concreto do anel. Após a blindagem de concreto do anel, foi posicionado um espalhador, representando um cenário de espalhamento do feixe em elementos presentes nas cabanas ópticas.

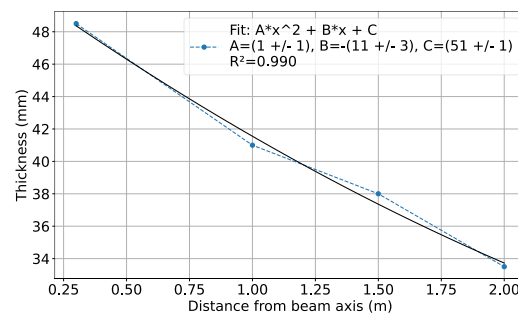
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Espessuras para radiação síncrotron

Com o FLUKA, após determinarmos a região da parede onde obtemos o maior fluxo de fótons incidentes, fez-se os gráficos da taxa de dose em função de sua espessura para diferentes distâncias entre feixe e parede. Na Fig.5 temos os resultados obtidos para a parede em aço com o FLUKA e os coeficientes obtidos com um ajuste quadrático para a espessura em função da distância do feixe.



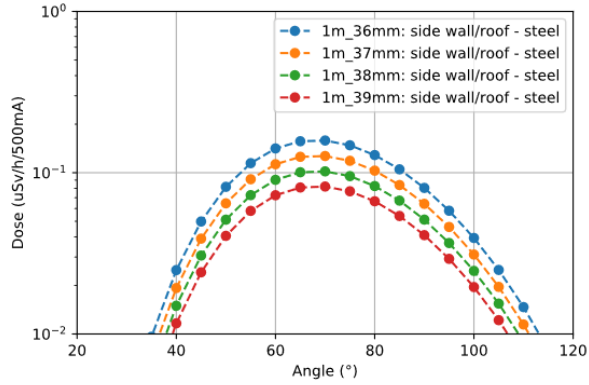
(a) Taxa de dose em função da espessura



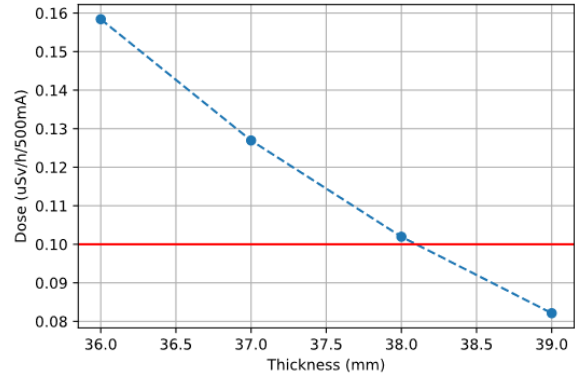
(b) Espessuras em função da distância do feixe

Figura 5: Resultados obtidos com o FLUKA.

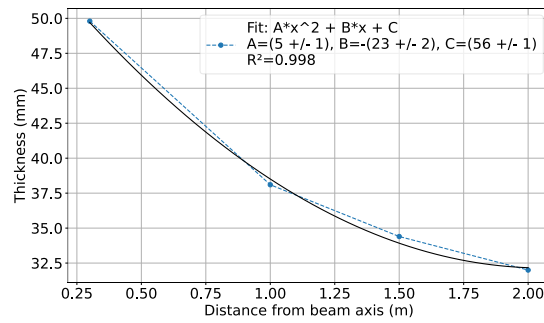
O STAC8, por sua vez, fornece valores de taxa de dose equivalente fora da parede em função do ângulo de espalhamento. Os valores máximos de dose para cada espessura foram agrupados em um gráfico e com ele foi determinado o valor de espessura (eixo x) correspondente ao valor de dose limite ($y = 0,1 \mu Sv/h$). Nas figuras abaixo temos os gráficos utilizados para a determinação da espessura em aço para a parede a 1 m e os coeficientes do ajuste quadrático.



(a) Taxa de dose em função do ângulo



(b) valores máximos de dose para aço a 1.0 m



(c) Espessuras em função da distância do feixe

Figura 6: Resultados obtidos com o STAC8.

Para posições intermediárias, prevalece o maior valor de espessura para a menor a distância. Os resultados obtidos tanto para aço quanto para chumbo estão presentes nas Tabela 1.

Tabela 1. Resultados para paredes laterais e teto para radiação síncrotron.

	Aço (mm)		Valor adotado (mm)	Chumbo (mm)		Valor adotado (mm)
	FLUKA	STAC8		FLUKA	STAC8	
Parede entre 30 cm e 1 m	48,5	49,8	49,8	5,8	5,6	5,8
Parede entre 1 m e 1,5 m	41,0	38,1	41,0	4,6	4,6	4,6
Parede entre 1,5 m e 2 m	38,0	34,4	38,0	4,2	4,2	4,2
Parede a 2 m ou mais	33,5	32,0	33,5	3,7	4,0	4,0

Os resultados pelo código FLUKA foram muito próximos aos obtidos pelo código STAC8 para as paredes laterais da cabana óptica, variando no máximo 10%. Para as definições finais, foram considerados os maiores valores entre os códigos.

No caso da parede traseira, há duas espessuras para cada tipo de material: a primeira obtida no ponto de dose máxima, próximo a zero grau, usada para determinação da espessura total (parede + reforço) e a segunda sendo a espessura necessária a uma distância de 25 cm do feixe, sendo essa a espessura da parede para um reforço quadrado de 50 cm por 50 cm. Esses valores podem ser encontrados na Tabela 2.

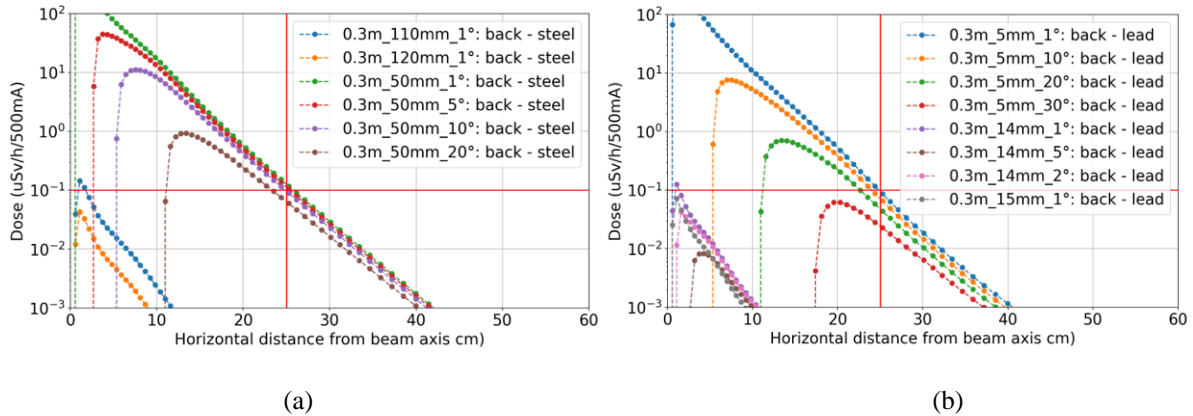


Figura 7: Dose em função da profundidade da parede traseira em aço (a) e chumbo (b) obtidos com o FLUKA.

Tabela 2. Resultados para parede traseira para radiação síncrotron

	Aço (mm)		Valor adotado (mm)	Chumbo (mm)		Valor adotado (mm)
	FLUKA	STAC8		FLUKA	STAC8	
Parede traseira	35,0	50,8	50,8	4,5	5,0	5,0
Reforço de 50 cm x 50 cm	45,0	62,0	62,0	2,5	9,4	9,4
Espessura total (região central)	80,0	112,8	112,8	7,0	14,4	14,4

Neste caso, os valores encontrados para o STAC8 foram muito maiores que os obtidos pelo FLUKA. Isso se deve ao fato de que, devido a algumas limitações presentes nos softwares, não avaliamos exatamente o mesmo cenário. Assim, foram adotadas as maiores espessuras fornecidas pelo código analítico STAC8.

3.2. Espessuras para radiação gas *Bremsstrahlung*

A figura 8 mostra os valores de dose para a região da cabana óptica obtidos com o FLUKA. Note que a dose já está abaixo do limite de $0,25 \mu\text{Sv/h}$ mesmo antes das paredes. Portanto, para as blindagens, foram adotados os valores obtidos para radiação síncrotron.

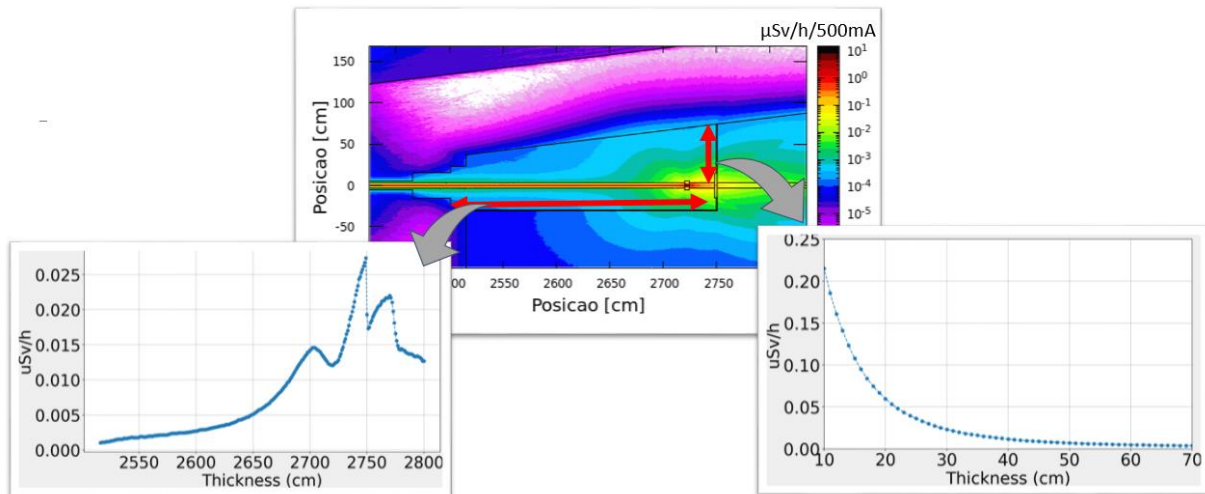


Figura 8: Taxa de dose total em $\mu\text{Sv/h}$ para um plano horizontal ao plano do feixe pelo FLUKA.

4. CONCLUSÕES

Para a cabana óptica analisada da linha proveniente de um BC, a contribuição de dose nas paredes proveniente da radiação *gas Bremsstrahlung* é muito menor que da radiação síncrotron. As espessuras necessárias para as paredes laterais da cabana óptica para as distâncias de 30 cm, 1 m, 1,5 m e 2 m do feixe são de 5,8 mm, 4,6 mm, 4,2 mm e 4,0 mm em chumbo e de 49,8 mm, 41,0 mm, 38,0 mm e 33,5 mm para aço, respectivamente. Para a parede traseira, a espessura obtida foi de 50,8 mm para aço ou 5,0 mm de chumbo com reforço de 50 cm x 50 cm com espessura de 62 mm em aço ou 9,4 mm em chumbo.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Asano and N. Sasamoto, "Development of shielding design code for synchrotron radiation beam line", Radiation Physics and Chemistry 44, 133 (1994).
- [2] Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) – “Norma CNEN NN 3.01”; Resolução 164/14 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.
- [3] Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) – “Norma CNEN NE 6.02”; Resolução 261/20 – Licenciamento de Instalações Radioativas.
- [4] "FLUKA: a multi-particle transport code" A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773
- [5] ICRP, 2007. “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.” ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [6] O. Chubar, P. Elleaume, "Accurate and Efficient Computation Of Synchrotron Radiation In The Near Field Region", proc. of the EPAC98 Conference, 22-26 June 1998, p.1177-1179.
- [7] ‘Projeto Sirius: a nova fonte de luz síncrotron brasileira’. Disponível em: <<http://33xsde360x812eonrv2k9xl4-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/08/Livro-do-Projeto-Sirius-2014.pdf>>. Acesso em 20. jun.2020.