# Análise da Influência da Blindagem na Dose de Radiação em Microssatélites em Órbita Baixa utilizando o SPENVIS

Renato Carvalho Santos Gomes da Silva[1,2], Ranulfo da Silva Dias[1,2], Claudio Antonio Federico[1,2]
[1]Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil
[2]Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP – Brasil

***Resumo* – A radiação espacial representa uma das principais ameaças à confiabilidade dos sistemas eletrônicos embarcados em microssatélites. Em órbitas baixas, partículas energéticas provenientes dos cinturões de radiação podem provocar degradação acumulativa dos componentes eletrônicos. Este trabalho avalia a influência da blindagem de alumínio sobre a dose acumulada em uma missão de órbita baixa de 400 km, inclinação de 51,6°, em um período de 730 dias. Os cálculos foram realizados com *Space Environment Information System (SPENVIS)* utilizando os modelos A*tmospheric Proton Model version 8 (AP-8)*, *Atmospheric Electron Model version 8 (AE-8)* e *SHIELDOSE-2*, e geometria de meio semi-infinito de alumínio. Os resultados demonstraram uma redução superior a 99% da dose acumulada para espessuras de blindagem a partir de 1,5 mm, além da existência da região de retornos decrescentes para espessuras acima de 5 mm. Observou-se uma transição da contribuição dominante dos elétrons para os prótons aprisionados conforme o aumento da espessura da blindagem. Os resultados obtidos fornecem subsídios para análises preliminares de blindagem em microssatélites.**

***Palavras-Chave* – Blindagem, Radiação, Órbita Baixa.**

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o rápido crescimento do mercado de microssatélites tem impulsionado a necessidade de desenvolvimento de plataformas de baixo custo para cumprir missões científicas e tecnológicas cada vez mais ambiciosas. Microssatélites e *cubesats*, que antes eram em sua maioria projetos de pesquisa ou acadêmicos, passaram a desempenhar papel relevante em missões científicas avançadas e em constelações comerciais voltadas para observação da Terra, telecomunicações e monitoramento ambiental [1]. Esse movimento é impulsionado, sobretudo, pela crescente disponibilidade e evolução dos componentes eletrônicos comerciais de prateleira (*COTS*), que oferecem níveis adequados de desempenho para aplicações espaciais, contribuindo para a redução dos custos e dos prazos de desenvolvimento dos sistemas embarcados [2].

Por outro lado, a utilização de componentes *COTS* eleva a vulnerabilidade dessas plataformas ao ambiente espacial, uma vez que esses dispositivos não foram originalmente projetados para suportar fluxos de radiação ionizante. Em órbitas baixas da Terra, o ambiente radiativo é dominado por prótons e elétrons aprisionados nos cinturões de Van Allen, além de contribuições de raios cósmicos galácticos e partículas solares energéticas [3]. A distribuição e intensidade desses fluxos variam em função dos parâmetros orbitais da missão, especialmente altitude e inclinação, bem como da fase do ciclo solar [4]. Órbitas com inclinações médias, como por exemplo a órbita da Estação Espacial Internacional (*ISS*) que apresenta inclinação de 51,6°, implicam em uma maior quantidade de passagens pela região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS), área onde o campo magnético da Terra apresenta menor intensidade, o que permite que o cinturão interno de Van Allen se aproxime mais da Terra e eleve significativamente os níveis de radiação [5], resultando em doses acumuladas maiores do que em órbitas equatoriais de mesma altitude.

Dentre os efeitos da radiação espacial que podem comprometer a confiabilidade de sistemas eletrônicos, destacam-se a Dose Ionizante Total (*TID*) e os Efeitos de Evento Único (*SEE*). Enquanto a *TID* provoca degradação acumulativa devido à energia depositada ao longo do tempo, os *SEE* são causados pela interação de uma partícula energética com o componente eletrônico, podendo resultar em falhas transitórias, como as inversões de bits (*SEU*), até eventos destrutivos, como o Travamento por Evento Único (*SEL*) e a Queima por Evento Único (*SEB*). Embora ambos os efeitos sejam relevantes para a confiabilidade de sistemas espaciais, este trabalho se concentra na análise da *TID*, por se tratar do principal efeito cumulativo mitigado pela blindagem.

A *TID* pode provocar alterações em parâmetros elétricos como aumento da tensão de limiar em transistores e consequente aumento da corrente de fuga, além de falha permanente de funcionamento dos dispositivos semicondutores, em casos extremos. Medições realizadas a bordo de duas missões com microssatélites em órbita baixa mostraram que os valores anuais de *TID* encontram-se na ordem de centenas de rad, variando em função da blindagem e da localização dos componentes no interior do satélite [6].

A blindagem metálica é a estratégia mais amplamente adotada para mitigação da *TID* em missões de órbita baixa da Terra (*LEO*). O alumínio, material estrutural típico de microssatélites, também atua como blindagem à penetração de partículas carregadas. Contudo, o aumento da espessura de blindagem implica no acréscimo de massa, que é um fator relevante no desenvolvimento desse tipo de plataforma espacial de pequeno porte. Nesse contexto, compreender a relação entre a espessura de blindagem e dose absorvida é fundamental para servir de suporte à tomada de decisão em projetos que buscam otimizar o compromisso entre proteção à radiação e massa estrutural.

O presente estudo tem como objetivo avaliar a influência da espessura de blindagem de alumínio sobre a Dose Ionizante Total acumulada em uma missão de órbita baixa

Renato Carvalho Santos Gomes da Silva, renato.csgs@gmail.com; Ranulfo da Silva Dias, ranulfo143@gmail.com; Claudio Antonio Federico, claudiofederico@ieav.cta.br.

circular de 400 km, com inclinação de 51,6° em um período de 730 dias. Para tanto, utilizou-se o sistema *Space Environment Information System (SPENVIS)* [7], um sistema desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (*ESA*) que fornece acesso a modelos do ambiente espacial e ferramentas de análise para avaliar os efeitos do espaço em plataformas espaciais, tripulações e componentes, valendo-se dos modelos de ambiente radiativo *Atmospheric Proton Model version 8 (AP-8)* e *Atmospheric Electron Model version 8 (AE-8)*, e do modelo de dose *SHIELDOSE-2*. Além disso, o trabalho investiga a contribuição de elétrons e prótons aprisionados para a dose total acumulada, bem como a região em que o acréscimo de espessura provoca pouca diminuição na referida dose.

## II. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido com uso do sistema *SPENVIS*, que integrou os modelos do ambiente de radiação e da resposta do material. Inicialmente foram definidos os parâmetros orbitais da missão e os espectros de partículas aprisionadas para, em seguida, calcular a Dose Ionizante Total acumulada para diferentes espessuras da blindagem.

Foi considerada uma missão em órbita baixa circular, com altitude de 400 km, inclinação de 51,6° e duração de 730 dias. Esses parâmetros foram escolhidos por representarem uma condição típica de operação de microssatélites e por serem semelhantes à órbita da Estação Espacial Internacional, cuja trajetória realiza passagens frequentes pela região da AMAS, uma das áreas de maior intensidade de radiação em órbitas baixas. Além disso, trata-se de uma órbita amplamente utilizada em estudos do ambiente espacial, permitindo a comparação dos resultados com trabalhos já publicados.

A caracterização do ambiente radiativo foi obtida por meio dos modelos AP-8 e AE-8, amplamente empregados em análises preliminares de engenharia espacial para estimar os fluxos médios de prótons e elétrons aprisionados nos cinturões de Van Allen. Foi adotada a condição de máximo solar disponível nos modelos AP-8 e AE-8 utilizados no SPENVIS, de modo a representar um cenário de referência para a avaliação da Dose Ionizante Total acumulada ao longo da missão.

A estimativa da Dose Ionizante Total foi realizada por meio do modelo *SHIELDOSE-2*, implementado no próprio *SPENVIS*. Esse modelo calcula a dose absorvida em materiais eletrônicos a partir dos espectros de partículas incidentes, considerando separadamente as contribuições de elétrons, prótons e da radiação secundária produzida por *bremsstrahlung*. O material sensível adotado foi o silício, representativo dos dispositivos semicondutores utilizados em sistemas eletrônicos embarcados. Para a blindagem foi considerada a geometria de meio semi-infinito de alumínio, configuração amplamente utilizada em análises preliminares por representar adequadamente componentes localizados próximos às estruturas externas do satélite.

A fim de avaliar a influência da blindagem sobre a Dose Ionizante Total no material de silício, foram analisadas espessuras de alumínio entre 0,05 mm e 20 mm. Para cada espessura, foram extraídos os valores da dose acumulada, bem como as contribuições individuais dos elétrons e prótons aprisionados. A partir desses resultados, foram elaborados uma tabela e quatro gráficos que relacionam a espessura da blindagem com a Dose Ionizante Total, permitindo identificar a eficiência da blindagem em diferentes faixas de espessura, a região de retornos decrescentes e a transição da contribuição dominante dos elétrons para os prótons aprisionados.

## III. RESULTADOS

A Tabela I apresenta os valores de Dose Ionizante Total acumulada em função da espessura de blindagem de alumínio, obtidos ao longo dos 730 dias de missão, bem como a redução de *TID* acumulada em relação à espessura de 0,05 mm, com vistas a facilitar a comparação da redução da dose acumulada em relação ao aumento de espessura.

TABELA I. DOSE IONIZANTE TOTAL ACUMULADA EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE BLINDAGEM

| ***Espessura de Alumínio (mm)*** | ***Dose Ionizante Total (rad)*** | ***Redução da dose em relação à espessura de 0,05 mm de Al (%)*** |
|---|---|---|
| 0,05 | 75.220 | - |
| 0,10 | 34.010 | 54,8 |
| 0,20 | 11.640 | 84,5 |
| 0,30 | 5.722 | 92,4 |
| 0,50 | 2.347 | 96,9 |
| 1,00 | 804 | 98,9 |
| 1,50 | 420 | 99,4 |
| 2,00 | 249 | 99,7 |
| 3,00 | 105 | 99,86 |
| 5,00 | 36 | 99,95 |
| 10,00 | 20 | 99,97 |
| 20,00 | 14 | 99,98 |

A partir dos valores apresentados na Tabela I, foram construídos os gráficos das Fig. 1 a 4, que permitem visualizar diferentes aspectos da influência da blindagem sobre a Dose Ionizante Total.

A Fig. 1 mostra o comportamento da Dose Ionizante Total acumulada em função da espessura de blindagem de alumínio. É possível observar uma queda acentuada nos primeiros milímetros, seguida de uma redução progressiva para espessuras superiores. A inclinação da curva evidencia que as maiores atenuações ocorrem justamente na faixa de 0 a 2 mm, região na qual a *TID* decresce mais de três ordens de grandeza.

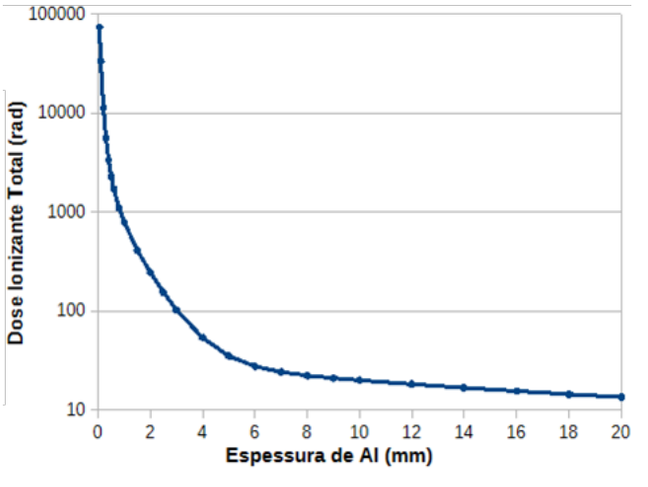



Fig. 1. Dose Ionizante Total acumulada em função da espessura de blindagem de alumínio.

A Fig. 2 apresenta a redução percentual da Dose Ionizante Total acumulada em relação à espessura mínima (0,05 mm). O gráfico mostra a dimensão da redução da dose, dado que o aumento da espessura de 0,05 mm para 1 mm reduziu quase 99% da dose, enquanto os acréscimos subsequentes proporcionaram redução de menos de 1% de dose.

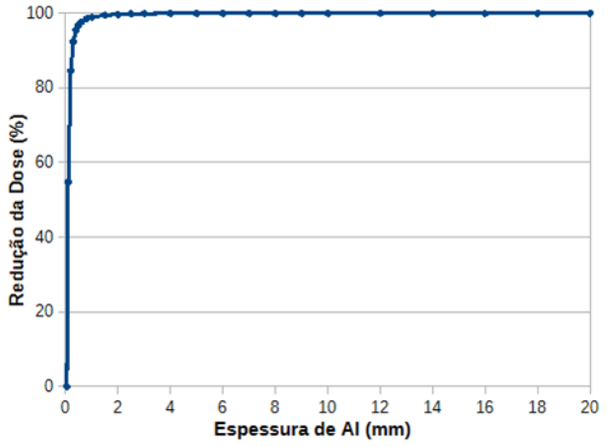



Fig. 2. Redução percentual da Dose Ionizante Total acumulada em relação à espessura de 0,05 mm.

A Fig. 3 mostra as contribuições individuais dos elétrons e prótons aprisionados para a Dose Ionizante Total acumulada em função da espessura da blindagem de alumínio. Observa-se uma redução extremamente acentuada da contribuição dos elétrons, que diminui de aproximadamente 75 krad para valores praticamente nulos à medida que a blindagem aumenta. Em contraste, a contribuição dos prótons apresenta redução mais gradual, permanecendo na faixa de dezenas de rad, mesmo para blindagens espessas. O cruzamento das curvas ocorre na espessura próxima de 4 mm, indicando uma transição do mecanismo dominante da dose acumulada. Esse resultado evidencia que a blindagem não apenas diminui a dose absorvida, mas também altera o tipo de radiação predominante.

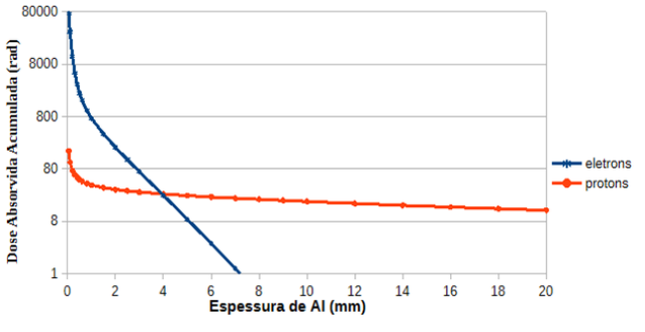



Fig. 3. Contribuição dos elétrons e prótons aprisionados para a Dose Absorvida acumulada.

A Fig. 4 apresenta a participação relativa dos elétrons e prótons aprisionados na dose ionizante total acumulada em função da espessura da blindagem de alumínio. Para blindagens com espessuras de até 1,5 mm, os elétrons constituem a principal fonte de dose, respondendo por mais de 90% da Dose Ionizante Total acumulada. Porém, como possuem menor poder de penetração, sua contribuição diminui rapidamente com o aumento da espessura. Para espessuras entre 4 mm e 5 mm, observa-se uma transição da contribuição dominante dos elétrons para os prótons. Para blindagens superiores a 10 mm, a contribuição dos elétrons torna-se desprezível, enquanto os prótons aprisionados passam a representar quase que a totalidade da dose acumulada.

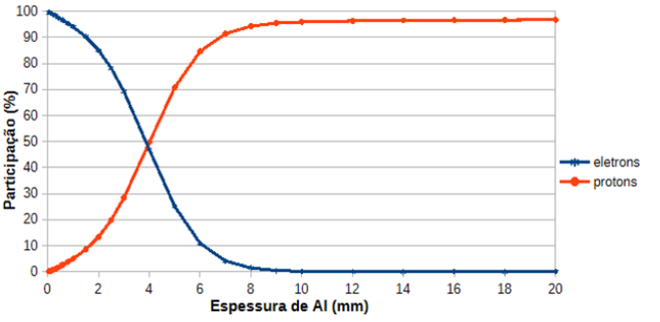



Fig. 4. Participação relativa dos elétrons e prótons aprisionados na Dose Ionizante Total em função da espessura da blindagem de alumínio.

## IV. DISCUSSÕES

A análise dos resultados permite identificar três regiões distintas no comportamento da blindagem. A primeira região, compreendida entre 0,05 mm e 1 mm de espessura de alumínio, apresentou grande atenuação, pois pequenos incrementos na espessura resultaram em expressivas reduções da Dose Ionizante Total. Nessa faixa, a dose acumulada é predominantemente causada por elétrons aprisionados, que representam mais de 94% da contribuição total. Devido à sua baixa massa e ao pequeno poder de penetração, quando comparados aos prótons, os elétrons interagem de maneira intensa com o material da blindagem, perdendo energia rapidamente. Como consequência, os primeiros milímetros de alumínio são capazes de reduzir grande parte dessa contribuição, provocando a acentuada redução da dose observada nessa região.

A segunda região, com espessuras entre 2 mm e 5 mm, ainda apresenta reduções significativas da Dose Ionizante Total, porém com intensidade progressivamente menor. Nessa faixa, grande parte da contribuição dos elétrons já foi atenuada pela blindagem, fazendo com que a dose residual comece a depender mais dos prótons aprisionados, que possuem maior capacidade de penetração.

A terceira região, acima de 5 mm, apresenta retornos decrescentes, em que aumentos adicionais da espessura da blindagem resultam em reduções relativamente pequenas da dose acumulada.

Esse comportamento está em concordância com estudos anteriores sobre efeitos da blindagem em sistemas espaciais. Wertz et al. [8] destacam que estruturas típicas de pequenos satélites empregam espessuras equivalentes de alumínio entre aproximadamente 2 mm e 4 mm, faixa na qual já ocorre significativa redução da Dose Ionizante Total.

De forma semelhante, análises realizadas com o SHIELDOSE-2 indicam que os maiores ganhos de atenuação ocorrem nos primeiros milímetros de blindagem, enquanto incrementos adicionais proporcionam reduções progressivamente menores da dose acumulada [9].

Os resultados obtidos neste trabalho reproduzem esse comportamento, evidenciando que espessuras superiores a

aproximadamente 5 mm apresentam retornos marginais reduzidos quando comparadas ao aumento de massa associado.

Sob a perspectiva de engenharia de sistemas espaciais, os resultados indicam que a definição da espessura de blindagem não deve ser baseada exclusivamente na minimização da dose acumulada. Em plataformas de pequeno porte, como CubeSats e microssatélites, restrições de massa e volume frequentemente limitam o aumento da espessura estrutural. Dessa forma, a região compreendida entre aproximadamente 2 mm e 5 mm de alumínio mostra-se particularmente relevante, pois combina reduções expressivas da Dose Ionizante Total com penalidades de massa relativamente moderadas. Para espessuras superiores, a redução adicional da dose torna-se progressivamente menor, tornando recomendável avaliar alternativas complementares de mitigação, como seleção de componentes tolerantes à radiação, posicionamento estratégico dos equipamentos e blindagem localizada de subsistemas críticos.

Esse comportamento é consistente com estudos sobre blindagem de microssatélites, que apontam a massa e o volume como fatores determinantes no dimensionamento estrutural [10]. Em projetos convencionais, as paredes estruturais de alumínio geralmente apresentam espessuras entre 2 mm e 3 mm e, quando níveis adicionais de proteção são necessários, torna-se importante avaliar o compromisso entre o ganho de blindagem obtido e o aumento de massa imposto.

Os modelos *AP-8*, *AE-8* e *SHIELDOSE-2* mostraram-se adequados para a análise da influência da blindagem na Dose Ionizante Total em órbitas *LEO*. Os resultados permitiram identificar de forma consistente a redução da dose com o aumento da espessura de alumínio, bem como a mudança da contribuição dominante dos elétrons para os prótons aprisionados. Dessa forma, a metodologia adotada fornece uma base útil para análises preliminares de blindagem em microssatélites.

Embora os resultados obtidos pelo *SHIELDOSE-2* forneçam uma base sólida para o dimensionamento preliminar da estrutura do microssatélite, é importante ressaltar as limitações inerentes aos modelos analíticos e semi-empíricos. O modelo *SHIELDOSE-2* estima a dose depositada assumindo uma geometria simplificada, como o meio semi-infinito de alumínio. Na prática, os microssatélites possuem arranjos internos complexos e heterogêneos, onde placas de circuito, baterias e outros subsistemas atuam como blindagens adicionais, o que altera o perfil de atenuação da radiação espacial, tornando o uso de códigos de simulação Monte Carlo uma evolução natural e necessária para fases posteriores do projeto.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência da espessura da blindagem de alumínio sobre a Dose Ionizante Total acumulada em uma missão representativa de microssatélite em órbita baixa circular. Os resultados mostraram que os maiores ganhos de proteção ocorreram nos primeiros milímetros de blindagem, com redução expressiva da dose acumulada para espessuras de até aproximadamente 5 mm. Acima desse valor, observou-se uma região de retornos decrescentes, na qual aumentos adicionais da espessura proporcionaram benefícios cada vez menores, ou seja, apesar do aumento da espessura propiciar redução da dose, o ganho marginal de proteção tornou-se gradualmente menor.

A análise das contribuições individuais também evidenciou uma mudança na contribuição dominante da dose ao longo da curva de blindagem. Enquanto os elétrons aprisionados predominaram para pequenas espessuras, os prótons aprisionados representaram a principal parcela da dose residual para blindagens mais elevadas.

Dessa maneira, os resultados obtidos fornecem subsídios para análises preliminares da blindagem de microssatélites, e contribuem para a avaliação do compromisso entre proteção à radiação e restrição de massa em missões de órbitas baixas, bem como identificam faixas de espessura nas quais ocorrem maiores ganhos de proteção e a transição entre a predominância de elétrons e prótons.

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar a influência da espessura da blindagem em órbitas de diferentes altitudes e inclinações, como também utilizar materiais alternativos de blindagem. Adicionalmente, pretende-se estender o estudo para investigar a influência da blindagem nos Efeitos de Evento Único, como o *SEU*, *SEL* e *SEB*, de modo a fornecer uma avaliação mais completa sobre ganhos de proteção e confiabilidade de sistemas eletrônicos embarcados em microssatélites, bem como expandir essas estimativas analíticas para modelagens usando softwares de simulação Monte Carlo, como GEANT4 ou PHITS.

## REFERÊNCIAS


[1] A. Poghosyan, A. Golkar, “CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions”, Progress in Aerospace Sciences, vol. 88, p. 59–83, 2017.

[2] T. Neubert et al., “System-on-module-based long-life electronics for remote sensing imaging with CubeSats in low-earth-orbits”, Journal of applied remote sensing, vol. 13, n. 3, p. 1–17, 2019.

[3] W. Li, W, M. K. Hudson, “Earth's Van Allen Radiation Belts: From Discovery to the Van Allen Probes Era”, Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 124, n. 11, p. 8319–8351, 2019.

[4] S. Calders et al., “SPENVIS – Space Environment Information System”, in *Proc. Living Planet Symposium*, Milan, Italy, 2019.

[5] M. M. Meier et al., “Impact of the South Atlantic Anomaly on radiation exposure at flight altitudes during solar minimum”, Scientific Reports, vol. 13, n. 1, p. 9348, 2023.

[6] L. Finazzi et al., “Total ionizing dose measurements in small satellites in LEO using LabOSat-01”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. 1064, p. 169344, 2024.

[7] European Space Agency. (2026) SPENVIS: Space Environment Information System. Acesso em: 15/03/2026. [Online]. Disponível em: https://www.spenvis.oma.be.

[8] J. R. Wertz et al., *Space Mission Engineering: The New SMAD*, Hawthorne: Microcosm Press, 2011, vol. 28.

[9] S. M. Seltzer, *Updated Calculations for Routine Space-Shielding Radiation Dose Estimates: SHIELDOSE-2*, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994.

[10] D. L. Thomsen III et al., “Shielding considerations for CubeSat structures during solar maximum”, in *Proc. Small Satellite Conference*, Logan, United States, 2023.