

SIMULAÇÃO DE BLINDAGEM CONTRA RADIAÇÃO IONIZANTE EM SATÉLITES DE ÓRBITA BAIXA (LEO)

Carmo T. A.¹, Lapa J.¹, Dias R.¹, Frigi F. L.¹, Santana G. G.¹, Federico C. A.²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo – Em satélites, a blindagem é um componente essencial para reduzir a ação das partículas sobre os sistemas eletrônicos. Especificamente, componentes de prateleira comumente necessitam de blindagem para atenuar a radiação e ampliar o tempo de vida da aplicação. Neste contexto, estruturas mistas compostas por Ta + Al-Li ou Ta + Ni-Cr no formato sanduíche têm o potencial de promover a redução do potencial energético das partículas, tornando-as menos agressivas à saúde do sistema. O objetivo deste estudo é analisar o comportamento de duas composições de blindagem e a eficiência no quesito absorção de radiação, assim como o potencial de penetração da partícula primária. As blindagens e a disposição das camadas foram simuladas utilizando os softwares SRIM e OLTARIS para um cenário proposto. Ambas as blindagens se mostraram promissoras no quesito frenagem para partículas de até 10 MeV e com baixa deposição de radiação no componente.

Palavras-Chave – SRIM, OLTARIS, Satélites LEO, Radiação TID.

I. INTRODUÇÃO

A radiação espacial representa um risco significativo para missões espaciais tripuladas e satélites em órbita baixa (LEO). A exposição prolongada à radiação ionizante pode causar danos aos componentes eletrônicos do satélite, comprometendo seu funcionamento e vida útil. A dose total de ionização (TID – *Total Ionizing Dose*) é uma medida importante da quantidade de radiação absorvida por um material ao longo do tempo e serve como um indicador da degradação induzida por radiação em dispositivos eletrônicos [2]-[9]. Com base na premissa do ambiente agressivo de exposição espacial, a blindagem é essencial para proteger os *payloads*. Entretanto, materiais como o alumínio têm sido amplamente utilizados como elemento secundário ou primário na composição da blindagem devido à sua leveza e estabilidade estrutural. No entanto, a eficácia da blindagem de alumínio diminui com o aumento da energia da radiação incidente, especialmente contra os raios cósmicos galácticos (GCR) de alta energia [8]-[10].

Para mitigar as limitações da blindagem composta por alumínio, materiais alternativos e compósitos multicamadas têm sido explorados. Polietileno (PE) e Kevlar, ricos em hidrogênio, demonstraram ser eficazes na redução da dose de radiação, especialmente contra nêutrons secundários gerados na interação entre GCR e materiais da espaçonave [4]. O hidrogênio presente nesses materiais ajuda a moderar os nêutrons, diminuindo sua energia e, conseqüentemente, a dose de radiação. O uso de compósitos multicamadas oferece a possibilidade de combinar as propriedades desejáveis de diferentes materiais para otimizar a blindagem contra radiação. A estrutura e a composição dos compósitos, incluindo a fração

volumétrica das camadas, a espessura de cada camada e a sequência de empilhamento, desempenham um papel na eficácia da blindagem. Dessa forma, a inclusão de compósitos de polietileno reforçado com fibra de grafite (PE-G) pode levar a uma blindagem mais eficaz contra a radiação [9].

A atenuação da radiação em um compósito multicamadas depende do caminho livre médio da radiação em cada fase do compósito, da ordem de microns, e da sequência de interação e atenuação, que é mais complexa em um compósito real do que em um compósito em camadas usado em estudos de simulação [6].

Além dos compósitos de PE-G, outros materiais e combinações têm sido investigados para blindagem contra radiação espacial. O solo solto e rochoso encontrado na superfície de Marte tem sido considerado como um material de blindagem potencial devido à sua disponibilidade *in-situ* e propriedades de atenuação de radiação. Trabalhos anteriores investigaram a eficácia de escudos de radiação feitos de regolito marciano e polímeros leves e ricos em hidrogênio, como polietileno, Kevlar e hidreto de lítio (LiH) [4]-[7]. Os resultados mostraram que o regolito marciano, em combinação com LiH, demonstrou maior eficiência na redução da dose em comparação com outras combinações.

Outra combinação mais pertinente e de baixo custo é a construção da estrutura de atenuação por meio de materiais metálicos como o tântalo (Ta) [11]-[13]. Ligas de Ta são comumente usadas em combinação com outros materiais, como a liga de alumínio e lítio (Al-Li) ou até mesmo níquel-cromo (Ni-Cr). Referente ao Al-Li, essa liga tem como característica ser mais leve que o alumínio puro [12]. Já o Ni-Cr é conhecido por ter excelente resistência à corrosão e estabilidade térmica. Na composição química do Ni-Cr, é possível encontrar elementos aditivos como molibdênio (Mo), cobalto (Co) e ferro (Fe). Sendo assim, o presente estudo avalia a efetividade de duas composições de blindagem compostas por materiais metálicos em minimizar a radiação TID e reduzir a penetração da partícula primária com energia de 10 MeV.

II. ABORDAGEM METODOLÓGICA

Para mensurar a quantidade de energia depositada no silício (Si), foi adotado o software OLTARIS (*On-Line Tool for the Assessment of Radiation In Space*) para simular o ambiente *in-situ*. O simulador OLTARIS é uma ferramenta online desenvolvida pela NASA para auxiliar cientistas e engenheiros a avaliarem os efeitos da radiação espacial em humanos e equipamentos eletrônicos. O cenário de simulação adotado para o OLTARIS considerou como parâmetro o ciclo solar 25, com tempo de duração da missão estimado em 1 ano,

iniciando em 1 de janeiro de 2022, conforme demonstrado na região delimitada na Figura 1. Os parâmetros de altitude do satélite adotados foram de 400 km para uma órbita circular e inclinação igual a 51,64°. Para *Galactic Cosmic Ray* (GCR), foi utilizado o modelo Badhwar-O'Neill 2020; para prótons presos, o modelo AP8; e a geometria da blindagem foi considerada esférica.

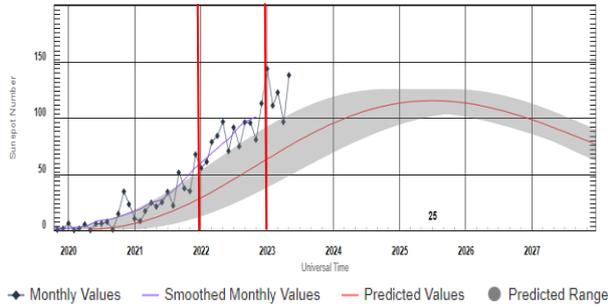


Fig. 1. ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression.

Para a simulação com o software *Stopping and Range of Ions in Matter* (SRIM), foi adotado o íon de hidrogênio (H+) com energia da partícula igual a 10 MeV, conforme demonstrado na Figura 2.

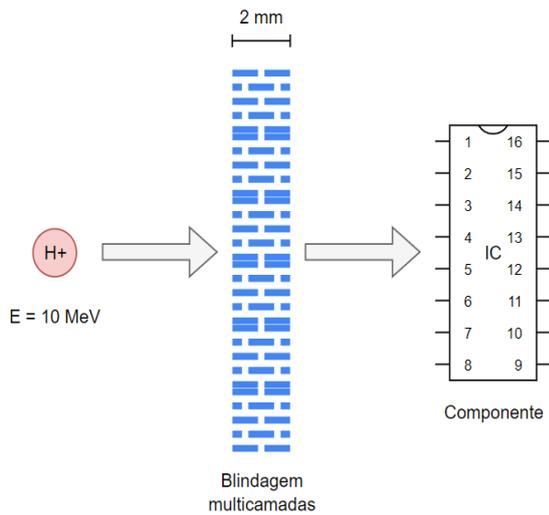


Fig. 2. Modelo de Simulação SRIM.

No presente estudo, foram selecionados três materiais metálicos: Ta, Al-Li e Ni-Cr. Essas ligas são amplamente utilizadas nas indústrias química, petroquímica e aeroespacial. Suas principais características incluem resistência à corrosão, alta resistência mecânica e resistência a altas temperaturas. Dessa forma, para compor a blindagem analisada, foram estruturadas duas blindagens para simulação em ambos os softwares, sendo cada uma composta por multicamadas, conforme demonstrado na Tabela 1.

TABELA I. ESTRUTURA DA BLINDAGEM.

Blindagem	Camada	g/cm^3	[mm]
B1	C1	Ta	16,601
	C2	Al-Li	2,594

Blindagem	Camada	g/cm^3	[mm]
B2	C1	Ta	16,601
	C2	Ni-Cr	8,495

III. DADOS DE SIMULAÇÃO

Quando um próton de alta energia penetra em um material, ocorre uma série complexa de interações, influenciadas pelas propriedades únicas do material e pelas características intrínsecas da partícula incidente. Inicialmente, o próton pode ionizar os átomos do material, arrancando elétrons e gerando pares de íons e elétrons. Essa ionização eletrônica é crucial para o entendimento do efeito da radiação no material. Além disso, o próton pode sofrer dispersão de Rutherford, sendo desviado pelos núcleos dos átomos do material devido à interação eletromagnética. Esse fenômeno é particularmente relevante em materiais com alto número atômico, como o tântalo, onde a interação entre o próton e os núcleos é mais significativa, conforme observado nas Figuras 3 e 5.

Outra consequência importante da interação próton-material é a perda de energia por colisões inelásticas. O próton pode transferir parte de sua energia cinética para os núcleos do material durante as colisões, resultando na excitação dos átomos ou até mesmo em reações nucleares. Finalmente, em interações mais energéticas, podem ocorrer processos nucleares que levam à produção de partículas secundárias, como nêutrons e píons (*Bremsstrahlung*). Essas partículas secundárias podem ter efeitos significativos na radiação depositada no material.

Dessa forma, para simular o comportamento do componente eletrônico (Si), foi acrescentada uma terceira camada, que, no entanto, não interfere nos dados de simulação, como observado nas Figuras 3 e 5, uma vez que a partícula primária não atinge o material-alvo.

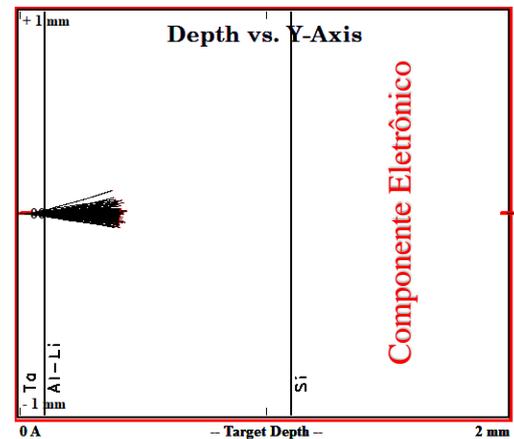


Fig. 3. Penetração máxima do H+ para composição B1.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

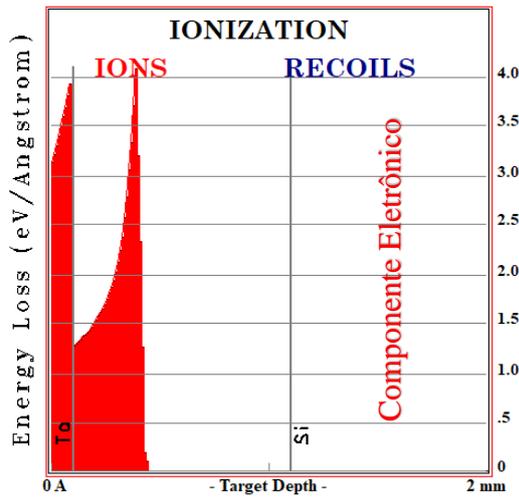


Fig. 4. Ionização máxima do H+ para composição B1.

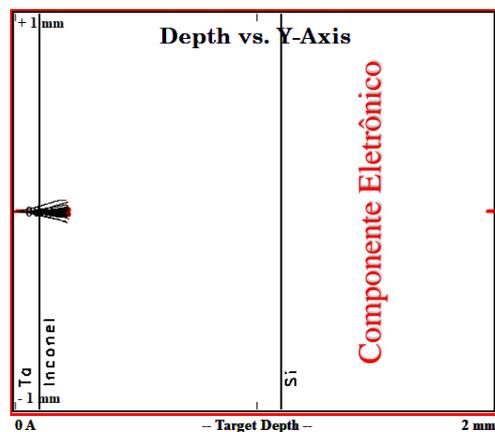


Fig. 5. Penetração máxima do H+ para composição B2.

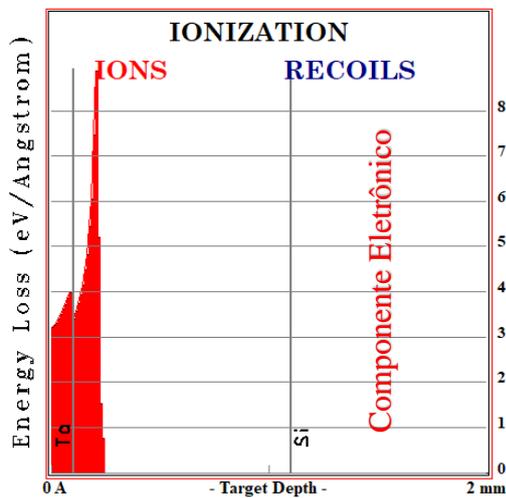


Fig. 6. Ionização máxima do H+ para composição B2.

OLTARIS:

TABELA II. RESULTADOS OLTARIS

Blindagem	$eV/\text{\AA}$
B1	8,593E11
B2	7,271E11

Os resultados obtidos por meio do software de simulação SRIM demonstram a capacidade de cada uma das blindagens em frear uma partícula com energia de até 10 MeV. Com base nessa análise, as Figuras 4 e 6 mostram quatro momentos de interação entre a partícula e o material.

Em virtude da perda de energia inicial da partícula, esta é máxima na superfície do material-alvo. Isso é esperado, pois a densidade eletrônica é maior próximo à superfície, o que resulta em maior ionização inicial. No início (próximo de 0 Å) (Figuras 4 e 6), a perda de energia é extremamente alta, indicando uma forte interação entre os íons H+ e os átomos do material-alvo (Ta).

À medida que os íons penetram no material, a taxa de perda de energia diminui, pois os íons já perderam parte significativa de sua energia inicial, e a densidade de átomos ao longo do caminho se mantém constante. A queda abrupta na perda de energia pode ser observada à medida que os íons atravessam a camada de tântalo (Ta) e entram nas camadas de alumínio-lítio (Al-Li) e Inconel.

A transição entre os materiais primário e secundário é marcada por uma mudança na taxa de perda de energia, devido às diferentes propriedades eletrônicas e de massa atômica dos dois materiais que compõem a subcamada protetora. O tântalo, sendo um metal denso, causa uma maior perda de energia inicial em comparação ao Al-Li e ao Ni-Cr. Dessa forma, o SP eletrônico ocorre por meio de interações coulombianas com os elétrons dos materiais-alvo. Essa interação excita e ioniza os elétrons presentes na camada e transfere energia do íon para o sistema eletrônico do material. Por outro lado, o SP (*Stopping Power*) nuclear promove o deslocamento dos átomos presentes na rede cristalina do material. Quanto menor a energia, maior o dano devido aos desvios angulares na trajetória do íon.

A profundidade de penetração do íon H+ não atinge o material-alvo (Si). A perda de energia devido à ionização (área vermelha destacada nas Figuras 4 e 6) predomina até uma profundidade significativa, após a qual a contribuição dos recoils se torna mais relevante.

Os dados obtidos por meio do SRIM indicam uma melhor capacidade de frenagem para a blindagem do tipo B2 em comparação com a B1. O mesmo cenário se repete para os dados de órbita, para energia depositada, obtidos através do software OLTARIS, conforme mostrado na Tabela 2. A composição B1 (Figura 3), quando em interação com H+, reduz a penetração da partícula com um SP de 0,45 mm, enquanto para a composição B2 o SP é de 0,21 mm (Figura 5). O revestimento em tântalo contribui para atenuar a energia da partícula, porém, materiais com um Z atômico elevado aumentam a produção de radiação secundária (*Bremsstrahlung*). O Inconel, embora possua resistência contra radiação e seus efeitos, ainda assim não apresenta a mesma eficiência que ligas à base de Al. Os dados de energia depositada para a B1 demonstram menor interação na troca de materiais quando comparados aos da B2, obtendo valores iniciais de deposição de energia equivalentes a 1,35 eV/Å e 3,73 eV/Å, respectivamente, demonstrando melhor interação entre o Inconel e a partícula.

V. CONCLUSÃO

As estruturas propostas no presente estudo mostraram-se promissoras na redução da radiação absorvida pelo componente. Portanto, o objetivo de otimizar o coeficiente de proteção foi alcançado para ambas as composições de blindagem. Um fator limitante da simulação com o SRIM é a impossibilidade de mensuração da radiação secundária. Sendo assim, o software é eficaz na aferição do SP (*Stopping Power*); em contrapartida, o OLTARIS apresenta resultados que se aproximam do especificado em trabalhos correlatos, dada sua capacidade de simular o cenário completo com parâmetros de órbita.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] Zaccardi, F., Toto, E., Santonicola, M. G., & Laurenzi, S. (2022). 3D printing of radiation shielding polyethylene composites filled with Martian regolith simulant using fused filament fabrication. *Acta Astronautica*, 190, 1–13.
- [2] El-Jaby, S., Lewis, B. J., & Tomi, L. (2020). A commentary on the impact of modelling results to inform mission planning and shield design. *Life Sciences in Space Research*, 25, 148–150.
- [3] Badavi, F. F. (2011). A low earth orbit dynamic model for the proton anisotropy validation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269(20), 2614–2622.
- [4] Al Zaman, M. A., Roy, S., Sarker, S., Azad, M. M. U., Akib, A. A., & Haque, M. M. (2023). Comparative analysis of the effectiveness of natural polymers and conventional space radiation shielding polymers in spacecraft for prolonged space expeditions. *Materials Research Express*, 10(11), 115301.
- [5] Warden, D., & Bayazitoglu, Y. (2021). Consideration of Backscatter Radiation from Galactic Cosmic Rays in Spacecraft Shielding Design. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 35(3), 650–656.
- [6] Slaba, T. C., & Singleterry, R. C. (2020). Correct modeling results are needed to inform mission planning and shield design. *Life Sciences in Space Research*, 25, 143–147.
- [7] Al Zaman, M. A., & Kunja, L. A. (2023). Effectiveness of radiation shields constructed from Martian regolith and different polymers for human habitat on Mars using MULASSIS/GEANT4 and OLTARIS. *AIP Advances*, 13(8), 085108.
- [8] Gohel, A., Makwana, R., & Soni, B. (2022). Evaluating Shielding Materials for High Energy Space Radiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1221(1), 012003.
- [9] Emmanuel, A., & Raghavan, J. (2015). Influence of structure on radiation shielding effectiveness of graphite fiber reinforced polyethylene composite. *Advances in Space Research*, 56(8), 1288–1296.
- [10] O'Connor, A., Park, C., Baciak, J. E., & Manuel, M. V. (2024). Mitigating space radiation using magnesium (-lithium) and boron carbide composites. *Acta Astronautica*, 216, 37–43.
- [11] KLAMM, Benjamin. Passive space radiation shielding: Mass and volume optimization of tungsten-doped polyphenolic and polyethylene resins. 2015.
- [12] Naito, M., Kodaira, S., Ogawara, R., Tobita, K., Someya, Y., Kusumoto, T., Orimo, S. I. Investigation of shielding material properties for effective space radiation protection. *Life Sciences in Space Research*, v. 26, p. 69-76, 2020.
- [13] Uzel, Ramazan; Özyildirim, Alime. A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment. In: 2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). IEEE, 2017. p. 295-299.