



VI Congresso Internacional
de Ciências da Saúde

**RADIAÇÃO CÓSMICA E O APRIMORAMENTO DA BLINDAGEM
AERONÁUTICA: UMA BREVE REVISÃO E ANÁLISE.**

**RADIACIÓN CÓSMICA Y EL MEJORAMIENTO DEL BLINDAJE
AERONÁUTICA: UNA BREVE REVISIÓN Y ANÁLISIS.**

**COSMIC RADIATION AND THE IMPROVEMENT OF AIRCRAFT SHIELDING: A
BRIEF REVIEW AND ANALYSIS.**

Apresentação: Comunicação Oral

Luizy Drielly da Silva Moura; Ana Cláudia da Silva Alves; Paloma Raiane da Silva; Erick Viana da Silva;
Virgínia Célia Pessoa de Freitas

RESUMO

Os raios cósmicos são partículas que se movem rapidamente do espaço e bombardeiam constantemente a Terra de todas as direções. Além do campo magnético terrestre que funciona como um desviador da Radiação Cósmica (RC) incidente no planeta, a atmosfera terrestre age como um mitigador dessa radiação à medida que ela atravessa as camadas mais espessas da atmosfera. É reconhecido que a taxa de RC e seus subprodutos gerados na atmosfera aumentam conforme a elevação da altitude. Isso contribui para que as tripulações de aeronaves frequentemente ultrapassem o limite anual de dose de radiação recomendado por organismos internacionais para o público em geral. Conforme ocorra o enfraquecimento da camada protetora da Terra, há um aumento de exposição de radiação ionizante. Com o avanço tecnológico e a maior permanência no espaço radioativo de aeronavegação, é visto a melhoria na capacidade de proteção da blindagem. Este trabalho tem como objetivo abordar a questão do aprimoramento da blindagem de uso aeronáutico em decorrência do aumento da exposição à radiação de origem cósmica, com ênfase na saúde dos tripulantes. Questão modelada pela adição ao longo do tempo de materiais absorvedores de radiação ionizante em sua estrutura e pela avaliação de doses de RC. Será discorrido as características de compósitos procurando uma relação entre a quantidade de inserção de materiais absorvedores de radiação devido a elevação da área exposicional. Este trabalho é de natureza bibliográfica e documental, com um enfoque exploratório. Para isso, foram utilizados repositórios de periódicos internacionais e bancos de dados de entidades governamentais e multilaterais, que forneceram dados oficiais sobre o setor aeronáutico e questões climáticas. Observou-se que as proteções contra a radiação cósmica em aviões são restritas, mas incluem várias abordagens para reduzir a exposição e embora tenha acontecido aprimoramento na blindagem contra radiação ionizante, a dose nos tripulantes cresceu à medida do aumento de exposição.

Palavras-Chave: Aumento da exposição, Estrutura de aeronaves, Materiais absorvedores de radiação, Radiação ionizante, Saúde da tripulação.



RESUMEN

Los rayos cósmicos son partículas de alta velocidad provenientes del espacio que bombardean constantemente la Tierra desde todas las direcciones. Además del campo magnético terrestre, que actúa como un desviador de la Radiación Cósmica (RC) incidente en el planeta, la atmósfera terrestre actúa como un mitigador de esta radiación a medida que atraviesa las capas más gruesas de la atmósfera. Se reconoce que la tasa de RC y sus subproductos generados en la atmósfera aumentan con la altitud. Esto contribuye a que las tripulaciones de las aeronaves superen con frecuencia el límite anual de dosis de radiación recomendado por organismos internacionales para el público en general. A medida que se debilita la capa protectora de la Tierra, aumenta la exposición a la radiación ionizante. Con el avance tecnológico y la mayor permanencia en el espacio radioactivo de la aeronavegación, se observa una mejora en la capacidad de protección del blindaje. Este trabajo tiene como objetivo abordar la cuestión del mejoramiento del blindaje de uso aeronáutico debido al aumento de la exposición a la radiación de origen cósmico, con énfasis en la salud de las tripulaciones. Esta cuestión se modela por la adición a lo largo del tiempo de materiales absorbentes de radiación ionizante en su estructura y por la evaluación de dosis de RC. Se discutirán las características de los compuestos, buscando una relación entre la cantidad de materiales absorbentes de radiación insertados y el aumento del área de exposición. Este trabajo es de naturaleza bibliográfica y documental, con un enfoque exploratorio. Para ello, se utilizaron repositorios de revistas internacionales y bases de datos de entidades gubernamentales y multilaterales, que proporcionaron datos oficiales sobre el sector aeronáutico y cuestiones climáticas. Se observó que las protecciones contra la radiación cósmica en aviones son limitadas pero incluyen varios enfoques para reducir la exposición, y aunque han habido mejoras en el blindaje contra la radiación ionizante, las dosis en las tripulaciones han aumentado con mayor exposición.

Palabras Clave: Aumento de la exposición, Blindaje aeronáutico, Materiales absorbentes de radiación, Radiación cósmica, Salud de la tripulación.

ABSTRACT

Cosmic rays are particles that move rapidly from space and constantly bombard the Earth from all directions. In addition to Earth's magnetic field which acts as a deflector of the Cosmic Radiation (CR) incident on the planet, the Earth's atmosphere acts as a mitigator of this radiation as it traverses the thicker layers of the atmosphere. It is well known that the rate of CR and its by-products generated in the atmosphere increase with altitude. This contributes to aircraft crews often exceeding the annual radiation dose limit recommended by international organizations for the public. As the Earth's protective layer weakens, there is an increase in exposure to ionizing radiation. With technological advances and greater permanence in the radioactive space of aeronautics, improvements in shielding protection capacity are observed. This work aims to address the issue of improving shielding for aeronautical use because of increased exposure to radiation of cosmic origin, with an emphasis on the health of crew members. This issue is modeled on the addition of ionizing radiation absorbing materials to its structure over time and the evaluation of CR doses. The characteristics of composites will be compared, looking for a relationship between the amount of radiation-absorbing materials inserted and the increase in exposure area. This work is bibliographical and documental in nature, with an exploratory approach. To this end, international journal repositories and databases of governmental and multilateral entities were used, which provided official data on the aeronautical sector and climate issues. It was observed that protections against cosmic radiation in aircraft are limited but include various approaches to reduce exposure, and although there have been improvements in ionizing radiation shielding, crew doses have increased with greater exposure.

Keywords: Increased Exposure, Aircraft Structure, Radiation-absorbing Materials, Ionizing Radiation, Crew Health.

INTRODUÇÃO

A emissão natural intergaláctica de partículas energéticas, que atinge a troposfera superior e a estratosfera (áreas aeronavegantes), afeta de forma negativa os sistemas microeletrônicos das aeronaves e, potencialmente, a saúde da tripulação e dos passageiros. Tais partículas, ao chocarem com as moléculas presentes na camada protetora, liberam uma cascata de radiação secundária até que toda a energia seja absorvida pelo meio. Aeronaves são os exemplos de estruturas que requerem alto grau de segurança, por possuírem sistemas sensíveis a essas partículas. Dessa forma, como uma blindagem do planeta, o campo eletromagnético e a camada de ozônio desviam ou absorvem a Radiação Cósmica (RC), motivo pelo qual impede a ampliação desses raios cósmicos tanto na superfície terrestre quanto em alta altitude (Federico *et al*, 2012).

Todavia, o Campo Magnético Terrestre (B_T) não é uniforme, de polo a polo possui uma variedade de intensidade; logo, os extremos sul e norte têm a tendência a ser locais mais propensos a exposição à RC; além disso, soma-se a ampliação dos efeitos antropológicos no enfraquecimento da camada de ozônio (FEDERICO, 2011). Nos anos recentes, foi constatada uma significativa diminuição na espessura da camada de ozônio. Conseqüentemente, os efeitos provocados pela maior incidência de radiação tornaram-se perceptíveis. No fim do século XX, o uso demasiado de gases redutores de ozônio (componente da camada) no campo industrial, agravou as questões climáticas, segundo os registros do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), órgão criado pela Organização das Nações Unidas (ONU).

Com o aumento de exposição de radiação ionizante ao decorrer do agravamento dos efeitos prejudiciais na camada de proteção, houve a necessidade de uma blindagem aeronáutica capaz de suportar limites de doses de RC estabelecidos pela Proteção Radiológica - área na qual teve o maior destaque no uso da dosimetria para a proteção dos pilotos e tripulantes. Tais usuários da aviação foram considerados pela ICRP (*International Commission on Radiological Protection*, Comissão Internacional de Proteção Radiológica) na Publicação 60, em 1991, como pessoal ocupacionalmente exposto à radiação ionizante de origem natural. As doses podem ser calculadas a partir de informações sobre a lista de pessoal, dos perfis de voo e dos cálculos das taxas de dose de RC em função da altitude, da latitude geomagnética e da modulação solar (BARTLETT, 2004, tradução livre).

Diante desse cenário, é importante verificar se houve algum avanço no aprimoramento da blindagem aeronáutica no sentido de acompanhar a exposição à RC em decorrência do aumento da exposição. Para tanto, foi necessário identificar medidas de controle de riscos da RC na tripulação, conhecer os materiais empregados na construção aeronáutica e o grau da inserção de materiais absorvedores de radiação na estrutura para mapear, ao longo do tempo, os aprimoramentos nas estruturas aeronáuticas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Previamente, é importante entender alguns conceitos sobre a radiação ionizante para demonstrar biologicamente como a matéria orgânica e não orgânica são afetadas por raios e partículas energéticas, bem como a sua fonte natural cósmica. Nesse sentido, pesquisadores como James Maxwell, Heinrich Hertz, Wilhelm Röntgen, Marie Curie e Max Planck são responsáveis pela compreensão do espectro eletromagnético e suas características. Ondas de rádio, microondas (radar), luz infravermelha, luz visível, luz ultravioleta, raios X e raios Gama são todas radiações eletromagnéticas. Cada tipo apresenta diferentes comprimentos de onda e forma um espectro eletromagnético contínuo. Esse espectro é categorizado em radiações ionizantes, que têm energia suficiente para desintegrar átomos da matéria, e radiações não ionizantes, que se diferenciam pelo poder de penetração.

Além disso, afirma-se que a interação entre a radiação com material biológico pode acarretar efeitos deletérios, ou seja, há a possibilidade de risco de danos importantes ou irreversíveis no tecido humano. O organismo pode recompor seu DNA, entretanto, eventualmente, essa recomposição pode ser problemática e a célula duplica-se de forma defeituosa, resultando em complicações genéticas e o aumento da chance de desenvolver algum tipo de câncer. Os estágios dessa interação iniciam com ionizações e excitações dos átomos (partículas com energia transferida), em seguida, desequilíbrio eletrostático das moléculas, quebras das ligações químicas e fragmentos de outros átomos que podem se conectar a outras moléculas. Em consequência, há alterações morfológicas e funcionais dos órgãos (Turner, 2007).

Com o avanço tecnológico da exploração espacial na década de 60, houve um acréscimo de pesquisas científicas no ramo aeroespacial. A permanência prolongada no recém-explorado “espaço radioativo”, tanto nas altitudes terrestres da aeronavegação quanto no espaço sideral, estimulou esse crescimento. Nesse contexto, com a expansão da quantidade de voos e missões espaciais, necessitou-se da implantação de blindagens artificiais para minimizar a exposição

abundante aos raios cósmicos (Heinrich; Roesler; Schraube, 1999).

Essa radiação de origem cósmica possui núcleos carregados altamente energéticos e penetrantes que se propagam pelo espaço intergaláctico, sendo as partículas mais energéticas já detectadas na Terra. Divide-se entre a GCR (*Background Cosmic Radiation ou Galactic Cosmic Radiation*, Radiação Cósmica de Fundo ou Galáctica), oriundas de explosões energéticas de estrelas massivas, a SCR (*Solar Cosmic Radiation*, Radiação Cósmica Solar geradas pelo Sol) e ambas abarcam partículas, principalmente elétrons e prótons e, em menor quantidade, íons pesados (ICRP, 2016).

Depois que os raios cósmicos são criados e acelerados nas fontes, há a propagação pelo espaço interestelar sob a influência de campos magnéticos e de radiação nas regiões de microondas, infravermelho e rádio. Os campos magnéticos cósmicos podem produzir deflexões consideráveis na trajetória original das partículas, razão que dificulta o estabelecimento de qualquer relação direta com a posição original da fonte (Armand, 2023). Segundo Fioravanti (2012) em estudos voltados a possíveis fontes da RC, indica que por causa do encontro e da aniquilação de campos magnéticos com polaridades opostas, podem se formar raios cósmicos nas atmosferas de estrelas, bem como em objetos cósmicos compactos. Entre esses objetos, incluem-se buracos negros de massas estelares e núcleos ativos de galáxias. A interação dos campos magnéticos nesses ambientes extremos pode levar à formação dessas partículas de alta energia (Fioravanti, 2012; Bandeira, Mackedanz, 2019).

Acerca disso, na interação primária com o campo magnético terrestre, os resultados energéticos são defletidos ou absorvidos. Caso absorvidos, interagem com os elementos da camada protetora, uma vez que é um gás que ocorre naturalmente na região da estratosfera onde as partículas de ozônio se acumulam. Por conseguinte, o decaimento subsequente causa uma cascata de partículas secundárias de menor energia: nêutrons, píons, mésons, elétrons, fótons e outros prótons; as quais liberam uma quantidade à mais de radiação (ICRP, 2016; Armand, 2023). Nesse sentido, na medida em que mais rápido acontece o enfraquecimento da camada de proteção terrestre, mais suscetível é a penetração desses raios e partículas de alta potência no objeto.

Devido à maior proximidade com a capa protetora na área de aeronavegação, há maior vulnerabilidade a exposição; logo, usuários frequentes de transporte aéreo recebem o índice de radiação maior do que ao nível do solo. Ainda mostra que a radiação recebida durante um voo em baixas latitudes é menor por motivo da maior proteção oferecida pelo campo magnético da Terra. Essa proteção é mais intensa perto do equador e diminui gradualmente à medida que se aproxima dos polos. Tal fato ocorre porque o campo magnético terrestre desvia a radiação

cósmica de forma mais eficaz nas regiões equatoriais. Portanto, voos em latitudes mais baixas geralmente têm menor exposição à RC em comparação com voos em latitudes mais altas.

Enfraquecimento da camada de ozônio

Com aspecto na esfera climática, segundo Barreto (2008) foi adotada a Convenção de Viena para a Proteção da Camada de Ozônio responsável por instituir o primeiro passo para transformar consenso em ação global, dado em março de 1985. Anteriormente a esse passo, no século XX, tem-se a produção inicial de gases como o dióxido de carbono e amônia (principais gases do efeito estufa) utilizados maiormente na construção de refrigeradores, logo depois a enorme demanda de CFC-12 (diclorodifluormetano) e CFC-11 (triclorofluormetano) - elementos atóxicos, nem inflamáveis, com estabilidade química para refrigeradores. Ao perceber a mudança da quantidade de ozônio na camada e o aumento no câncer por radiação ultravioleta, foi publicado o primeiro artigo afirmando que os gases CFC's presentes na atmosfera poderiam destruir a camada de ozônio.

Na década de 80, foi assinado um acordo ambiental multilateral histórico - Protocolo de Montreal - cujas diretrizes seguidas pelos países que o adotassem, reduziram a velocidade com que esse enfraquecimento estava ocorrendo (BARRETO *et al*, 2008). Apesar disso, com o estilo de vida voltado ao uso desses gases em aerossóis, extintores de incêndio, pré-polímeros, aparelhos de ar-condicionado etc. A camada protetora mostrou a tendência de queda na concentração de ozônio, visto que uma redução de 10% do ozônio estaria associada ao presente aumento de câncer de pele na ordem de 26% (BARRETO *et al*, 2008). Durante os anos 1990 e o início dos anos 2000, a produção e o uso de CFCs foram interrompidos. Até 2009, 98% das substâncias regulamentadas pelo tratado haviam sido eliminadas.

Em um painel do relatório do IPCC (2021) destaca-se as variações de temperatura provocadas por diversos fatores de influência humana. De maneira preliminar, aborda as emissões de gases de efeito estufa, aerossóis e seus precursores como causadores do enfraquecimento da camada (IPCC, 2021, p.10). Destarte, o aquecimento global pode afetar a distribuição e a intensidade da radiação solar não ionizante, cuja emissão pode impactar o tecido humano em exposições prolongadas.

Dosimetria de aviões

É reconhecido que a taxa de radiação cósmica e seus subprodutos gerados na atmosfera

aumentam à medida que a altitude se eleva. Justificativa para que as tripulações de aeronaves ultrapassem o limite anual de dose de radiação recomendado por organismos internacionais para o público em geral. A quantidade de radiação que o corpo humano absorve se acumula ao longo do tempo, sem se dissipar (Federico, 2011, 2012). Portanto, quanto mais tempo de exposição, maior é a chance de desenvolver doenças fatais ao longo da vida. Dessa maneira, as aeronaves com maior teto operacional e o crescimento do tráfego aéreo, juntamente a maior autonomia de algumas aeronaves, tornaram o controle da dose de radiação ionizante recebida por pilotos, tripulação e equipamentos sensíveis (aviônicos) uma questão cada vez mais relevante nas áreas de saúde ocupacional, proteção radiológica, radiobiologia e segurança de voo (ICRP, 2016).

Com as recomendações da ICRP, na Publicação 60, a União Europeia introduziu uma diretriz de BSS (*Basic Safety Standards*, Normas e Padrões de segurança básica) que incluía a exposição às radiações ionizantes oriundas de fontes cósmicas, como exposição ocupacional (de risco em decorrência de seu trabalho). Tal diretriz foi incorporada em inúmeras normas e procedimentos, como na segurança aérea da JAA (*Joint Aviation Authorities*, União das autoridades da Aviação). Posteriormente, na publicação 75 (ICRP, 1985) mostrou preocupação com gestantes e pontuou essa exposição. Na última das publicações, a 132 (ICRP, 2016), houve ainda mais recomendações de segurança, monitoramento da quantidade de radiação e a disponibilidade das doses calculadas individualmente para os tripulantes presentes. Recomendações que visam a avaliação de riscos, limites de dose para diferentes grupos, monitoramento de exposições, capacitação profissional e comunicação de riscos.

Segundo o Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação (MCTI), o Brasil ocupa uma posição de destaque internacional em projetos aeronáuticos. Aeronaves civis e militares, projetadas e fabricadas no país, estão presentes em todo o mundo. Desde o pioneirismo de Santos-Dumont até os dias atuais, a pesquisa e o desenvolvimento em aviação têm caminhado juntos, traçando uma verdadeira estrada de êxito. A indústria aeronáutica brasileira, desde seu início em 1935 com o voo do M-7 – o primeiro avião nacional produzido por uma fábrica no país – até o KC-390, o maior projeto aeronáutico realizado no Brasil, possui uma história marcada por sucesso, ciência e tecnologia.

Nesse sentido, a norma de radioproteção da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em 2005, determinou Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE) o usuário sujeito à exposição usual ou potencial no espaço de trabalho ou treinamento em práticas autorizadas, além de expor requisitos básicos de proteção e aconselhar sobre o limite de altitude ideal para minimizar a exposição, por mais que os dosímetros pessoais não sejam geralmente considerados

necessários nessa rotina do trabalho. Essas ações de controle de dose facilitam a análise da dinâmica do campo radiativo no espaço aéreo do Brasil, dado que esse campo é complexo, apresentando variações em seu fluxo e espectro energético, não sendo, assim, simples de se determinar (FEDERICO *et al*, 2012).

Milisievert (mSv) é a unidade de medida da dose de radiação absorvida por tecidos humanos. Segundo a IAEA (*International Atomic Energy Agency*, Agência Internacional de Energia Atômica), órgão criado pela ONU, 6 mSv em um ano é uma dose típica de radiação recebida por tripulações que voam em rotas polares de longo curso e 20 mSv é o limite de dose por ano para pessoas que estão ocupacionalmente expostas à radiação devido ao seu trabalho. Em 2014, a AIEA emitiu os "Requisitos Gerais de Segurança Parte 3: Proteção contra Radiação e Segurança de Fontes de Radiação", frequentemente designados como BSS. Este documento, desenvolvido em colaboração com oito entidades internacionais, consolida as mais recentes evidências científicas sobre a exposição à radiação e serve como base para a regulamentação nacional em proteção e segurança radiológica.

A avaliação das doses da tripulação de aeronaves consiste em calcular diretamente a dose efetiva por unidade de tempo, para os fantasmas padrão definidos (modelos usados em dosimetria para simular a sensibilidade dos tecidos humanos com a radiação) e para geometria presumida do campo, em função da localização geográfica, da altitude e da fase do ciclo solar, e juntar estes valores com informações sobre a luz para obter estimativas das doses efetivas para os indivíduos (BARTLETT, 2004). Usa-se a estimativa dos valores por aplicativos, parâmetros genéricos ou medição com dosímetros.

Garantir a segurança em voos exige uma abordagem personalizada contra a radiação cósmica, segundo a ICRP. De maneira preliminar, passageiros ocasionais devem receber informações básicas sobre o tema. Já os viajantes frequentes, seja por motivos pessoais ou profissionais, precisam avaliar suas próprias doses de radiação para considerar ajustes em sua frequência de voos. Além disso, as autoridades aéreas e companhias devem promover uma cultura de proteção radiológica. Tripulantes, em destaque as grávidas, requerem cuidados especiais com ajustes em suas funções e orientação para minimizar exposição. Uma gestão operacional rigorosa, com educação, avaliação e registro de doses, também é fundamental para a tripulação, com ajustes na escala de voo conforme necessário.

Estrutura e blindagem aeronáutica

A blindagem dos aparelhos de voo advém de um procedimento complexo por meio do

uso de materiais especializados, os quais se tornaram mais eficientes e leves ao longo do aprimoramento. Essa proteção é distribuída de modo cuidadoso em diversas áreas da sua estrutura para garantir a segurança dos passageiros, dos sistemas eletrônicos e impactos físicos. Segmenta-se em blindagem balística contra projéteis e fragmentos de explosões; eletromagnética contra descargas elétricas e interferências de rádio; térmica contra temperaturas extremas e, como foco desse trabalho, a blindagem contra radiação de fonte cósmica (JOHN, ANDERSON, 2008).

A partir de informações das principais fabricantes de aeronaves, um transporte de aeronavegação é constituído por vários componentes essenciais, cada um com uma função específica. A fuselagem é a estrutura central e o elemento de ligação entre a asa e as empenagens, que abriga a cabine de comando, passageiros e carga. As asas são responsáveis por gerar a sustentação necessária para o voo e incluem elementos como *flaps*, que aumentam a sustentação durante decolagens e pousos; ailerons, que controlam o movimento de rotação; *slats*, que aumentam a sustentação em baixas velocidades; e *spoilers*, que reduzem a sustentação e auxiliam na desaceleração. A empenagem também conhecida como seção de cauda, localizada na parte traseira da aeronave, compreende o estabilizador horizontal, que ajuda a manter a estabilidade longitudinal; o estabilizador vertical, que contribui para a estabilidade direcional; o leme, que controla o movimento de guinada (direita/esquerda); e o profundor, que controla o movimento de arfagem (subida/descida). O trem de pouso é a estrutura que sustenta a aeronave durante o pouso e decolagem, podendo ser fixo ou retrátil. Os motores fornecem a propulsão necessária para o voo e podem ser a jato, turboélice ou pistão (HOMA, 2011).

Materiais compósitos

Inventores como Alberto Santos Dumont e os irmãos Orville e Wilbur Wright, desde os primórdios da aviação, precisaram escolher os materiais para construir suas aeronaves, seguindo certos critérios de seleção. Diante disso, considera-se o comportamento do material para manipulação desses, como a resistência a ambientes agressivos, resistência estática, à fadiga, à corrosão, à abrasão, capacidade de trabalho a alta e baixa temperatura, isolamento ou condutividade térmica, elétrica ou acústica (Giurgiutiu, 2016). Há dois fatores principais que motivam o estudo dos materiais compósitos: o econômico e o de desempenho. O primeiro está relacionado ao peso do material, já que os compósitos são mais leves que os materiais metálicos. No entanto, é necessário otimizar essa proteção por representar um peso adicional para a estrutura da aeronave. O segundo fator busca melhorar o desempenho dos componentes

estruturais, especialmente no que diz respeito às suas propriedades mecânicas (Mendonça, 2005).

Com o uso extensivo nas asas, nas seções da fuselagem, nas superfícies da cauda e nas portas, um material composto, também conhecido como compósito, é definido como a combinação de dois ou mais materiais a nível macroscópico que trabalham simultaneamente. Funcionando como uma unidade, ele visa obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresentaria (Neto e Pardini, 2006). Sendo possível a criação de um novo material enfatizando características específicas para objetivos desejados. Esse tipo de material é formado com base na ligação química entre um reforço e uma matriz - cujo material envolve o reforço, oferece proteção e distribui os esforços de maneira uniforme (Mendonça, 2005).

“A matriz é o material no qual as fibras são “mergulhadas”. Elas podem ser subdivididas em 3 grandes grupos. O primeiro e mais comum é o grupo das matrizes poliméricas, popularmente conhecidas como “resinas” e que podem ser termoendurentes (em inglês: “thermosetting”) ou termoplásticas. O segundo grupo é o das matrizes metálicas que podem envolver virtualmente qualquer metal. Por fim, temos as matrizes cerâmicas.” (ZANATTA, 2012, p. 7).

Sob essa perspectiva, têm-se os Materiais Absorvedores de Radiação (MAR), os quais são compostos por alto teor de hidrogênio e compostos por elementos de baixa massa atômica possuem boas propriedades de blindagem contra os efeitos nocivos da RC, por serem menos efetivos na geração de radiação secundária que os materiais pesados de alta massa nuclear (DIAS *et al*, 2000). Por exemplo, materiais carbonosos; polímeros condutores reforçados com metais, como resinas epóxi combinadas com metais pesados; cerâmicas densas, como zircônia e titânio, que são empregadas em componentes críticos para fornecer proteção adicional; e ferritas.

A classe de compósito termoestrutural busca combinar as propriedades de alto desempenho das fibras de carbono com as características únicas do próprio carbono. Esse material tem boa resistência à corrosão, baixa expansão térmica, estabilidade química e suportam bem mudanças bruscas de temperatura (Rezende, 2000). Dessarte, há diversos materiais como poliuretano, polietileno, poliestireno, óxidos de chumbo, tungstênio e bismuto, grafite, nanotubos de carbono e borrachas com adição de chumbo ou bismuto. Também são usados compostos híbridos de polímero-cerâmica e polímero-carbono para inserção na blindagem.

A princípio, durante as Primeiras e Segunda Guerras Mundiais, a blindagem era

rudimentar com foco na proteção dos pilotos e componentes vitais contra projéteis leves e fragmentos de explosivos. Com o progresso das tecnologias de mísseis e armas antiaéreas na Guerra Fria, materiais como alumínio e aço foram empregados, embora com limitações devido ao peso. Nas décadas de 1970 e 1980, houve uma transição para materiais compósitos, como fibra de vidro e fibra de carbono em matriz epóxi, que oferecem uma combinação de alta resistência e leveza, além de melhor desempenho em termos de fadiga e durabilidade (JOHN, ANDERSON, 2008). O uso de fibras de aramida, como o Kevlar, popularizou-se em razão da sua excelente resistência balística e baixo peso. Essas fibras são de modo frequente utilizadas em áreas críticas das aeronaves para proteção adicional. Mais recentemente, cerâmicas como carbeto de silício (SiC) e carbeto de boro (B4C) têm sido empregadas devido à sua alta dureza e capacidade de dissipar energia de impacto, embora o custo elevado desses materiais ainda seja um desafio (John, Anderson, 2008).

Os militares dos Estados Unidos foram os precursores na criação e implementação de materiais compósitos. Um exemplo é a aeronave AV-8B, que possuía uma fuselagem composta por 27% de compósitos, isso no início da década de 1980. O primeiro uso em grande escala de materiais compósitos em aviões comerciais ocorreu em 1985, quando o Airbus A320 decolou pela primeira vez com estabilizadores horizontais e verticais feitos de compósitos. A Airbus utilizou compósitos em até 15% do peso total das estruturas de suas aeronaves A320, A330 e A340 (Rezende, Botelho, 2000). O Boeing 757 e 767 contêm aproximadamente 1900 e 2860 libras de compósitos de grafite e Kevlar, respectivamente, com cada quantidade representando 3% do peso estrutural total da aeronave (Pilling, 1989). É evidente na figura abaixo a maior disposição de compósitos nas partes de aeronaves ao decorrer do tempo.

METODOLOGIA

Conforme os objetivos este trabalho teve a natureza bibliográfica e documental com caráter exploratório e localiza-se metodologicamente em uma revisão de literatura integrativa. Para tanto, foi operacionalizado, através de repositórios bibliográficos de periódicos reconhecidos internacionalmente e de banco de dados governamentais e de organismos multilaterais, pois proporcionaram dados oficiais a respeito da dosimetria de radiação no setor aeronáutico e da esfera climática para determinar o aumento de exposição; tais quais os órgãos criados pela Organização das Nações Unidas (ONU), *International Atomic Energy Agency* (IAEA) ou Agência Internacional de Energia Atômica; relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) ou Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;

Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), *European Union Aviation Safety Agency* (EASA) ou Agência Europeia para a Segurança da Aviação; No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC); Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN); Ministério de Ciências, Tecnologia e Inovação (MCTI), Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Espaciais (INPE) e Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DAS).

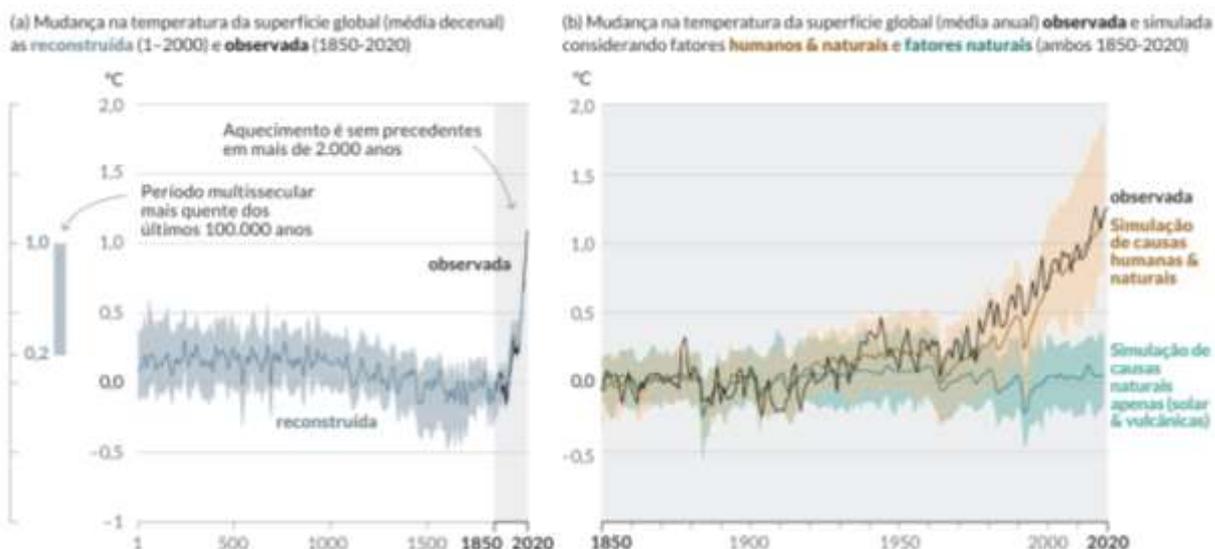
Em relação a busca por artigos científicos sobre a temática em questão, foram escolhidos, por conveniência, os bancos de dados do Google Acadêmico, *SciElo* e *ScienceDirect*. Além disso, documentos voltados aos fabricantes de aeronaves tais como Airbus, Boeing, Embraer e COMAC, a fim de saber sobre a disposição e mudanças de materiais na estrutura desses aparelhos de voo ao passar dos anos. O período entre 1960 e 2023 é um recorte histórico delimitado respectivamente pela corrida espacial e pela última atualização na blindagem aeronáutica, com destaque no ano de 1991, ano da inclusão de tripulantes como IOE.

A princípio, foram usadas as palavras-chaves: aumento da exposição, blindagem aeronáutica, compósitos aeronáuticos, materiais absorvedores de radiação, radiação cósmica, saúde da tripulação, *Increase in exposure, Aircraft shielding, Aerospace composites, Radiation-absorbing materials, Cosmic radiation, Crew health* para coleta de 256 produções acadêmicas nos bancos de dados citados. Após a obtenção desses dados, a leitura dos resumos foi realizada e 25 artigos, juntamente com dois livros, foram catalogados em uma planilha do Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta pesquisa tem como proposta analisar a relação entre a intensificação da exposição à RC e o aprimoramento da blindagem aeronáutica. Após verificado os relatórios do IPCC sobre a compreensão física mais recente do sistema climático e suas mudanças, informes da variação de doses de RC no interior de aeronaves, a consistência da adição dos MAR nas estruturas de aeronaves, serão tecidas as considerações e resultados aplicáveis.

Figura 1: Mudanças na temperatura da superfície global em relação a 1850-1900.



Fonte: IPCC, 2021, p.9

É visto o ano 1991, no qual há a inclusão dos tripulantes como IOE, com um pico de alta temperatura. As projeções abrangem as emissões diretas na atmosfera e suas repercussões, caso existam, sobre outros fatores climáticos. Enfrentar a radiação cósmica é uma condição natural do ambiente terrestre. Nas últimas décadas, era considerada de menor importância, pois a atmosfera e o campo magnético da Terra fornecem proteção contra a radiação cósmica. Agora, no entanto, há um aumento significativo na exposição individual e coletiva da tripulação e dos passageiros da aeronave à radiação cósmica e esse número aumentará no futuro (ICRP, 2013).

Informes de doses no interior de aeronaves

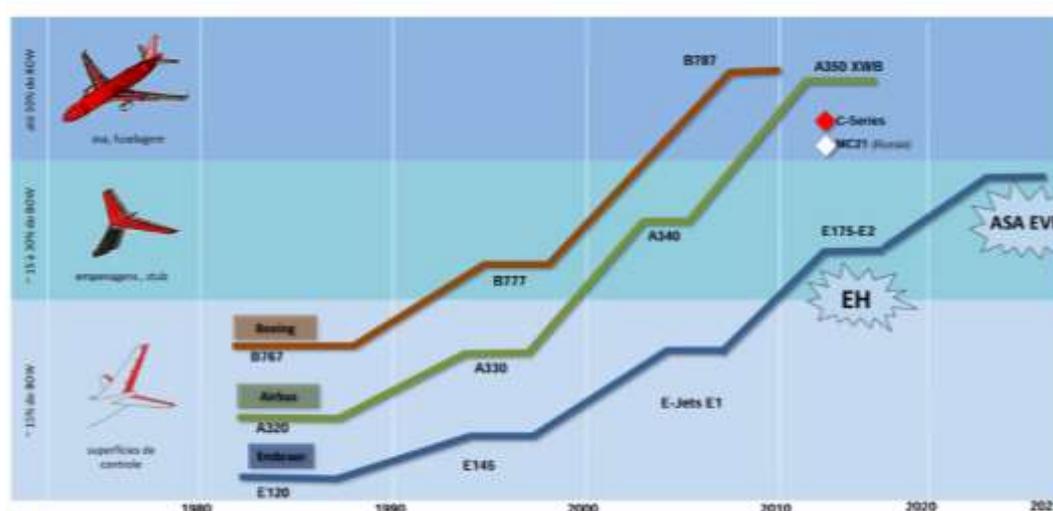
A intensidade da radiação cósmica varia conforme a localização geográfica e é influenciada significativamente pelo campo geomagnético, pela altitude e pelo ciclo solar. Portanto, a avaliação precisa deve seguir uma metodologia consistente. O relatório de doses da CNEN não puderam ser expressas numericamente, por dispor de restrições. Numerosos tripulantes brasileiros de aviões envolvidos em operações cotidianas realizam o monitoramento individual por meio do aplicativo CARI-6, desenvolvido pela FAA, que determina a quantidade de radiação cósmica galáctica que um indivíduo recebe ao voar na rota mais direta entre dois aeroportos ao redor do mundo. Com um apanhado de avaliações dosimétricas no espaço aéreo brasileiro, baseado nas pesquisas de Federico (2011) e de Rochedo, Alves, Wasserman (2020), cujo objetivo é estimar a contribuição de exposição à radiação cósmica em voos comerciais domésticos para a população brasileira, utilizou-se do mesmo programa computacional já citado.

De acordo do Federico (2011), por meio de estimativas, verificou-se que a dose média efetiva recebida por uma pessoa representativa do grupo mais exposto de equipes que atuam no espaço aéreo RVSM (altitudes entre 29.000 e 41.000 pés) na região da América do Sul e Caribe oscila entre 1,45 mSv e 1,67 mSv, conforme a fase do ciclo solar (FEDERICO, 2011). Já em consonância com Rochedo, Alves, Wasserman (2020), “As doses médias para voos domésticos no Brasil, calculadas em 2011 pelo software CARI-6, apresentaram variações de 0,3 a 8,8 μ Sv (0,0003 mSv a 0,0088 mSv)”(ROCHEDO, ALVES, WASSERMAN, 2020). Essas exposições de 2020 são consideradas mínimas em comparação à média global de 2,4 mSv/a. É mostrado o aumento de dose de radiação, apesar da adição de MAR na blindagem.

Adição de materiais absorvedores de radiação

De acordo com as propriedades químicas dos materiais e compósitos na estrutura de aeronaves, é notado na Figura 2 a predominância da adição de materiais absorvedores de radiação na blindagem das aeronaves da Boeing, da Airbus e da Embraer ao longo do tempo.

Figura 2: Disposição de compósitos em partes da estrutura entre 1980 e 2023.



Fonte: Ferreira, 2024.

Nesse sentido, tem-se o aprimoramento diante do avanço tecnológico, com a utilização de compósitos em sua estrutura, que possibilita uma construção leve e econômica. A eficiência no uso de compósitos é observada em diversas aplicações, como na proteção radiológica em hospitais e laboratórios, blindagem de equipamentos eletrônicos, proteção de astronautas e equipamentos em missões espaciais, e na detecção e absorção de radiação em aplicações de segurança.

CONCLUSÕES

Mediante o conhecimento de dosimetria de aeronaves e a questão do aumento de exposição, e perante as considerações comentadas sobre a relação entre esses fatores, é possível observar que, embora tenha ocorrido o aprimoramento na blindagem contra radiação ionizante devido à adição de MAR com o passar do tempo, a dose nos tripulantes cresceu à medida do aumento de exposição. Os resultados constataram que as defesas contra a radiação cósmica em aeronaves são limitadas, mas englobam diversas estratégias para mitigar a exposição.

A integração de novas tecnologias e materiais inovadores será crucial para garantir a segurança e o bem-estar das tripulações de aeronaves, especialmente em voos de longa duração e em altitudes elevadas. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem diferentes condições de voo e sua relação com a radiação cósmica. A indústria da aviação, juntamente aos órgãos reguladores, deve desenvolver diretrizes adicionais que considerem esses fatores para promover uma aviação mais segura e consciente em relação à exposição à radiação. Este estudo contribui para destacar a importância de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento para acompanhar o crescimento do setor aeronáutico.

REFERÊNCIAS

ALCOFORADO, Fernando. AQUECIMENTO GLOBAL, MUDANÇA CLIMÁTICA GLOBAL E SEUS IMPACTOS SOBRE A SAÚDE HUMANA. 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/50652674/AQUECIMENTO_GLOBAL_MUDAN%C3%87A_CLIM%C3%81TICA_GLOBAL_E_SEUS_IMPACTOS SOBRE_A_SA%C3%9ADE_HUMANA#:~:text=Este%20artigo%20tem%20por%20objetivo%20apresentar%20os%20impactos%20do%20aquecimento. Acesso em: 3 agost. 2024.

ANDERSON JUNIOR, John D.. Introduction to flight. 8. ed. [S.I]: New York, Ny : McGraw-Hill Education, 2016.

ARMAND, Johnier Pérez. Raios cósmicos de ultra-altas energias: origem e propagação. 2023. 999 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Fep, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-15052023-181859/pt-br.php>. Acesso em: 5 ago. 2024.

BANDEIRA, Yan Bueno; MACKEDANZ, Luiz Fernando. Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 4, e20190118, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0118>. Disponível em: www.scielo.br/rbef. Acesso em: 30 jun. 2024.

BARRETO, Luciano *et al.* A CAMADA OZÔNIO E AS SUBSTÂNCIAS QUE A DESTROEM. **Enciclopedia Biosfera**, [S.I], v. 6, n. 4, p. 1-18, 03 dez. 2008. Disponível em: <http://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/4878#:~:text=Resumo.%20A%20p>



resen%C3%A7a%20dos%20clorofluorcarbonos,%20na%20atmosfera,%20tem%20catalisado%20a. Acesso em: 5 ago. 2024.

BARTLETT, D. T. Radiation protection aspects of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 109, n. 4, p. 349–355, 2004. DOI: 10.1093/rpd/nch311.

BECHEPECHE, Anna Paula. OS EFEITOS PREJUDICIAS DA RADIAÇÃO CÓSMICA À SAÚDE DOS AERONAUTAS. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 1-23, 8 dez. 2020. Disponível em: https://revistas.unipacto.com.br/storage/publicacoes/2020/514_os_efeitos_prejudicias_da_radiacao_cosmica_a_saude_dos_aeronautas.pdf#:~:text=O%20presente%20artigo%20pretende%20discutir%20a%20tem%C3%A1tica%20acerca%20da%20radia%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 10 ago. 2024.

CAMPBELL, F.C.. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Material*. [S.I]: Elsevier Science, 2006. 617 p.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. 1. ed. Brasília: CNEN, 2005.

DIAS, J. de C. et al. Absorvedores de radiação eletromagnética aplicados no setor aeronáutico. *Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 8, n. 15, p. 33-42, 2000.

FEDERICO, Claudio Antonio *et al.* Effects of cosmic radiation in aircrafts: a discussion about aircrew over south america. *Journal Of Aerospace Technology And Management*, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 219-255, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.2012.04021012>.

FEDERICO, Claudio Antonio. DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO CÓSMICA NO INTERIOR DE AERONAVES NO ESPAÇO AÉREO BRASILEIRO. 2011. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-26012012104504/publico/2011FedericoDosimetria.pdf#:~:text=DOSIMETRIA%20DA%20RADIA%C3%87%C3%83O%20C%C3%93SMICA%20NO%20INTERIOR%20DE%20AERONAVES%20NO%20ESPA%C3%87O>. Acesso em: 15 ago. 2024.

FERREIRA, Marcos José Barbieri; NERIS JUNIOR, Celso Pereira. Avaliação dos impactos da Indústria 4.0 sobre o setor aeronáutico. *Revista Brasileira de Inovação*, [S.L.], v. 19, p. 1-31, 28 dez. 2020. Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658722>. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8658722>. Acesso em: 31 ago. 2024.

FIORAVANTI, Carlos. O início e o fim dos raios cósmicos. *Revista Pesquisa Fapesp*, [S.I.], v. 200, p. 18-23, out. 2012.

GIURGIUTIU, V. *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites*. [S.I.]: Elsevier Science, 2016. 470 p. ISBN 9780124104419. Acesso em: 6 ago. 2024.

HEINRICH, W.; ROESLER, S.; SCHRAUBE, H.. Physics of Cosmic Radiation Fields. **Radiation Protection Dosimetry**, [S.L.], v. 86, n. 4, p. 253-258, 1 dez. 1999. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032953>.

HOMA, Jorge M. **Aeronaves e motores**: conhecimentos técnicos. Asa, 2011.

ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).

ICRP, 2016. Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132. Ann. ICRP 45(1), 1–48.

IPCC, 2021: Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do Clima 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. No Prelo.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais**: ciência e tecnologia. 2. ed. [S.I]: Editora Blucher, 2016. 416 p.

MENCARINI, Leonardo de Holanda. **Estudo do comportamento de um detector de radiação passivo para fins aeronáuticos utilizando o método Monte Carlo**. 2013. 999 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-07022014-095250/pt-br.php#:~:text=Neste%20contexto,%20uma%20abordagem%20te%C3%B3rica%20por%20meio%20de%20simula%C3%A7%C3%B5es%20Monte>. Acesso em: 1 Ago. 2024.

MENDONÇA P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíches**. Barueri: Manoele, 2005.

PILLING, Mark, "The Leading Edge", Aerospace Composites and Materials, Winter 1988 1989, pp.48-504

RÊGO, Juliana Jeniffer Fernandes de Souza; SANTOS, Dino Lincoln Figueiroa; MARINHO, George Santos. Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. **Mens Agitat**, [S.I], v. 15, p. 35-42, 2020. Disponível em: <https://mensagitat.org/data/documents/MA-15-2020-35-42.pdf#:~:text=Resumo.%20Apresentam-se%20algumas%20etapas%20do%20desenvolvimento%20da%20aplica%C3%A7%C3%A3o%20de>. Acesso em: 25 ago. 2024

REZENDE, Mirabel C.; BOTELHO, Edson C.. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 4-10, jun. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/Sp5xW8K4WctGhyppz5Fhbmb/?lang=pt>. Acesso em: 1 jan. 2024.

ROCHEDO E.R.R., ALVES V.A., WASSERMAN M. A. V.. Avaliação da exposição do público e da tripulação de bordo em voos comerciais domésticos do Brasil. **Brazilian Journal**

of **Radiation Sciences**, Rio de Janeiro, Brazil, v. 8, n. 1, 2020. DOI: [10.15392/bjrs.v8i1.1105](https://doi.org/10.15392/bjrs.v8i1.1105). Disponível em: <https://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/1105>.. Acesso em: 19 ago. 2024.

TURNER, J. E. (2007), *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 127 Windham Road Oak Ridge, TN 37830 USA

ZANATTA, Rodrigo. *Materiais compósitos na aviação*. 2012. Online. Disponível em: <http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/7/>.. Acesso em: 01 ago. 2024.

