

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS  
ESCOLA POLITÉCNICA  
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AERONÁUTICAS



**A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS E DOS PADRÕES DE MANUTENÇÃO  
AERONÁUTICA COMO FATOR DE MITIGAÇÃO NO DESCARTE DE RESÍDUOS**

OSMAR PAULO DE FREITAS VIEIRA REIS

GOIÂNIA  
2023

OSMAR PAULO DE FREITAS VIEIRA REIS

**A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS E DOS PADRÕES DE MANUTENÇÃO  
AERONÁUTICA COMO FATOR DE MITIGAÇÃO NO DESCARTE DE RESÍDUOS**

Artigo Científico apresentado à Pontifícia  
Universidade Católica de Goiás como  
exigência parcial para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências Aeronáuticas.

Orientador:

Prof. Esp. Andréluiz da Silva Fernandes.

Banca Examinadora:

Prof. Esp. Salmen Chaquip Bukzen.

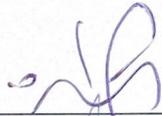
Prof. Me. Roberto Márcio dos Santos.

GOIÂNIA  
2023

OSMAR PAULO DE FREITAS VIEIRA REIS

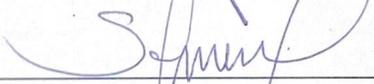
**A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS E DOS PADRÕES DE MANUTENÇÃO NA  
CONSTRUÇÃO AERONÁUTICA COMO FATOR DE MITIGAÇÃO NO DESCARTE  
DE RESÍDUOS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em sua forma final pela Escola Politécnica e de Artes, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Aeronáuticas, em 15/12/2023.



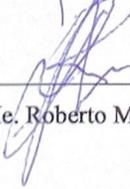
---

Orientador: Prof. Esp. André Luiz da Silva Fernandes



---

Prof. Esp. Salmem Chaquip Bukzen



---

Prof. Me. Roberto Márcio dos Santos

GOIÂNIA  
2023

# A EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS E DOS PADRÕES DE MANUTENÇÃO AERONÁUTICA COMO FATOR DE MITIGAÇÃO NO DESCARTE DE RESÍDUOS

## *THE EVOLUTION OF MATERIALS AND MAINTENANCE STANDARDS IN AIRCRAFT AS A MITIGATION FACTOR IN WASTE DISPOSAL*

Osmar Paulo de Freitas Vieira Reis<sup>1</sup>  
Andréluiz da Silva Fernandes<sup>2</sup>

### RESUMO

Este estudo aborda a manutenção de aeronaves, destacando a evolução dos materiais, os padrões de manutenção e a gestão de resíduos sólidos resultantes da atividade aérea. Desde o seu início, a aviação tem sido uma força motriz na conectividade global e no desenvolvimento econômico dos países, e os aviões, como máquinas complexas, exigem manutenção cuidadosa para garantir a segurança e a eficiência de suas operações. A partir dessas premissas, esta pesquisa tem como objetivo levantar os aspectos da história da aviação e evidenciar que a manutenção de aeronaves, dentro do contexto da evolução das técnicas/padrões de manutenção, como o *Hard Time*, o *Condition Monitoring* e o *On Condition*, é parte fundamental da mitigação no descarte dos resíduos gerados durante a operação e a manutenção de aeronaves. O trabalho aborda, ainda, o desenvolvimento e a transformação dos materiais utilizados nas aeronaves ao longo do tempo, destacando que o uso de materiais mais duráveis e sustentáveis contribuem para um mundo menos poluído. Para atingir os objetivos propostos, adotou-se como metodologia a pesquisa de natureza básica, qualitativa, descritiva e procedimentos bibliográfico e documental. Infere-se que a evolução dos materiais na indústria de construção aeronáutica e a gestão adequada de resíduos sólidos na aviação, assim como as regulamentações que orientam essa prática, possibilitam não somente mais segurança às operações, como também contribuem para a sustentabilidade ambiental na aviação, quesito indispensável às atividades aéreas e à qualidade de vida de todos.

**Palavras-chave:** Evolução. Materiais aeronáuticos. Manutenção. Sustentabilidade. Resíduos.

### ABSTRACT

*This study addresses aircraft maintenance, highlighting the evolution of materials, maintenance standards and the management of solid waste resulting from aviation activities. Since its inception, aviation has been a driving force in global connectivity and the economic development of countries, and planes, as complex machines, require careful maintenance to ensure the safety and efficiency of their operations. Based on these premises, this research aims to raise aspects of the history of aviation and highlight that aircraft maintenance, within the context of the evolution of maintenance techniques/standards, such as Hard Time, Condition Monitoring and On Condition. It is a fundamental part of mitigating the disposal of waste generated during the operation and maintenance of aircraft. The work also addresses the development and transformation of materials used in aircraft over time, highlighting that the*

---

<sup>1</sup> Graduando em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO). E-mail: osmarpaulo38@gmail.com

<sup>2</sup> Advogado; Especialista em Docência Universitária pela Universidade Católica (2005); professor Curso de Ciências Aeronáuticas na Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2002), E-mail: andreluizfernandes64@gmail.com.

*use of more durable and sustainable materials contributes to a less polluted world. To reach the proposed objectives, basic, qualitative, descriptive research and bibliographic and documentary procedures were adopted as methodology. It is inferred that the evolution of aeronautical industry's materials and the adequate management of solid waste in aviation, as well as the regulations that guide this practice, not only allow for greater safety in operations, but also contribute to environmental sustainability in aviation, an essential requirement for aerial activities and everyone's quality of life.*

**Keywords:** *Evolution. Aeronautical Materials. Maintenance. Sustainability. Waste.*

## **1 INTRODUÇÃO**

A aviação, desde os seus primórdios, tem desempenhado um papel fundamental na conectividade global, no desenvolvimento econômico e na exploração de fronteiras inexploradas. Os aviões, como máquinas complexas e engenhosas, encarnam o espírito humano de desafiar a gravidade e conquistar os céus. No entanto, por trás da maravilha do voo, existe uma infraestrutura intrincada e interdependente que requer cuidadosa manutenção para garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade contínuas das operações aeronáuticas.

A partir dessa realidade, a presente pesquisa aborda o universo da aviação e da manutenção aeronáutica, explorando a evolução dos materiais utilizados nas aeronaves, os padrões de manutenção implementados e a relevância da legislação relacionada à gestão de resíduos sólidos. Busca-se, assim, compreender as mudanças significativas que têm ocorrido ao longo dos anos, refletindo a constante demanda pela melhoria e adaptação na indústria da aviação.

Para atingir os objetivos propostos, adotou-se como metodologia a pesquisa de natureza básica, de abordagem qualitativa e objetivos descritivos. Os procedimentos adotados foram o bibliográfico e o documental, consubstanciado na busca pela temática em livros, artigos e sites especializados. Quanto à estrutura, o estudo foi dividido em quatro tópicos temáticos, além desta seção introdutória e das considerações finais.

O primeiro tópico aborda os primórdios da construção e da manutenção aeronáutica, a concepção e a evolução do avião como uma máquina que revolucionou a forma como o mundo se move, desde os primeiros voos titubeantes até as aeronaves modernas dotadas de alta tecnologia. Assim, será abordado como a manutenção sempre esteve entrelaçada com a história da aviação, partindo das abordagens pioneiras de Santos Dumont e Glenn Curtiss até as metodologias avançadas de hoje.

O segundo tópico trata da evolução dos padrões de manutenção e as diferentes possibilidades que acompanham o avanço da aviação. A análise de padrões de manutenção, como o Hard Time, o Condition Monitoring e o On Condition e suas implicações para o Total Time Between Overhaul (TBO), revelará como as práticas de manutenção evoluíram para atender às demandas de aeronaves cada vez mais complexas.

No terceiro tópico serão abordados os normativos legais mais relevantes sobre a temática, com ênfase na Política Nacional dos Resíduos Sólidos e na NBR 10.004/2004, evidenciando a importância da gestão adequada dos resíduos gerados pela indústria da aviação e pelas operação e manutenção das aeronaves. Nesse contexto, abordar-se-ão as regulamentações que orientam a disposição de resíduos, destacando a relevância da Política Nacional dos Resíduos Sólidos para a sustentabilidade das operações aéreas.

O quarto tópico, intitulado "Evolução dos materiais na aviação: impacto, durabilidade e sustentabilidade", investigará a evolução-transformação dos materiais de construção das aeronaves. Ao explorar o panorama dos materiais utilizados ao longo do tempo, desde as estruturas de madeira dos primeiros aviões até os compostos modernos de alta resistência, a discussão evidencia como essa evolução possibilitou o uso de outros materiais com melhor durabilidade, menor impacto ambiental e menos necessidade de manutenção das aeronaves.

Por fim, as considerações finais apresentarão as conclusões deste estudo, ressaltando como a constante inovação e a adaptação da indústria da aviação têm contribuído para uma aviação mais segura, eficiente e sustentável. Além disso, enfatiza-se a importância de uma gestão ambiental responsável e como a evolução dos materiais e padrões de manutenção desempenham um papel crucial na mitigação do impacto ambiental da indústria aeroespacial.

## **2 OS PRIMÓRDIOS DA CONSTRUÇÃO E DA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA**

De acordo com Guerrero (2023), a aviação é um dos maiores avanços da humanidade, uma vez que tornou possível a conquista dos céus e revolucionou as comunicações, os transportes e a forma de como o mundo é enxergado. Além disso, ela é uma das conquistas tecnológicas mais notáveis da humanidade, permitindo a superação das barreiras naturais e encurtando distâncias de forma extraordinária.

Segundo Oliveira (2022), a aviação tem seu crescimento gradativo e intenso, considerando as inúmeras possibilidades que pode trazer. Além disso, em sua essência, é uma proeza da engenharia que combina aerodinâmica, mecânica, eletrônica e sistemas complexos

em uma mesma unidade funcional, desenvolvida em resposta ao desejo humano de conquistar os céus e superar as limitações impostas pela gravidade.

A evolução dos primeiros aviões foi marcada por avanços graduais em *design* e na aerodinâmica. Pioneiros como Santos Dumont e Glenn Curtiss desempenharam papéis cruciais na construção de aeronaves capazes de voos mais longos e controlados. Seus projetos e descobertas permitiram que o avião fosse desenvolvido e o transporte aéreo criado (Jorge, 2018).

Segundo a ANAC (2021), o avião, em termos estruturais, é composto por diversas partes interligadas: as asas e a empenagem, projetadas com precisão para gerar sustentação aerodinâmica; os motores, que por sua vez fornecem a força propulsora; a fuselagem, que representa a camada de proteção exterior e abriga a tripulação, os passageiros as cargas e o trem de pouso. Além dessas, são embarcados diversos outros sistemas, como os computadores de bordo – que monitoram altitude, velocidade, temperatura e pressão – e os sistemas de navegação, comunicação e entretenimento, que proporcionam uma experiência de voo completa. Considerando todos esses fatores, é importante que haja instruções e procedimentos para a condução da aeronave, além de inspeções periódicas e as devidas manutenções.

Toda essa estrutura complexa que compõe as aeronaves modernas é fruto de uma evolução histórica, em que se destacam alguns marcos mais importantes. Segundo Lemos (2012), eventos como a Primeira e a Segunda Guerras Mundiais desempenharam um papel significativo no desenvolvimento da aviação, acelerando a produção de aeronaves militares e introduzindo inovações e sistemas de comunicação a bordo. Além disso, “as necessidades extraídas dos campos de batalhas fizeram com que a produção de aviões saltasse dos 10.000, número existente desde a sua invenção, para as estratosféricas 177.000 unidades produzidas no curto período de 4 anos – 1914 a 1918” (Lemos, 2012, p. 70).

Nos períodos pós-guerra, a aviação civil começou a ganhar destaque, com companhias aéreas pioneiras estabelecendo rotas regulares e ampliando a acessibilidade global. A década de 1920 viu avanços notáveis na tecnologia de aeronaves, com projetos como o Spirit of St. Louis de Charles Lindbergh, que realizou o primeiro voo solo transatlântico sem escalas em 1927. Esse marco abriu caminho para a era da aviação comercial, transformando viagens de longa distância e conectando continentes de maneira sem precedentes (Silva, 2009, p. 4).

O desenvolvimento dos aviões também foi fortemente influenciado por inovações em materiais e motores. A transição de motores a pistão para turbinas a jato na metade do século XX revolucionou a indústria, possibilitando velocidades mais altas e maior eficiência. Além

disso, materiais como ligas de alumínio, titânio e aço foram incorporados ao *design* das aeronaves, melhorando a durabilidade e o desempenho aerodinâmico (Rêgo *et al.*, 2020, p. 37), assim como os compósitos, adotados a partir da década de 1950.

Assim, os primeiros 50 anos da aviação foram marcados por importantes evoluções tecnológicas na construção das aeronaves, o que se seguiu nas décadas posteriores, com destaque especial para a concepção de materiais mais leves e resistentes com foco na economia, eficiência e sustentabilidade ambiental, objeto da última seção deste estudo.

Quanto à manutenção, ela igualmente vem desempenhando, desde o início da aviação, papel fundamental na garantia da segurança, confiabilidade e eficiência das aeronaves. De acordo com Rankin (2007), o Safety Report da International Air Transport Association (IATA) publicado em 2003 relata que, nos primórdios da aviação, cerca de 20% dos acidentes aéreos eram atribuídos a erros humanos, ao passo que os outros 80% eram causados por falhas mecânicas. O Annual Report da IATA de 2009 revela que, em 2008, cerca de 15% dos acidentes aéreos tiveram como principal causa falhas na manutenção das aeronaves, sendo que 57% desses acidentes incluíram deficiências na manutenção como parte da sequência de eventos que levaram a esses incidentes (IATA, 2009). Já no relatório anual de 2022, a IATA (2023) relata deficiências nas operações de manutenção na casa de 10% dos acidentes. Assim, evidencia-se a natureza complexa e intrincada dos aviões e um enfoque dedicado à manutenção para assegurar que essas máquinas pudessem operar de maneira consistente e segura.

Com efeito, com o avanço da aviação e o crescimento da indústria, a manutenção gradualmente se tornou mais estruturada e especializada. À medida que as aeronaves foram ficando mais complexas e as operações aéreas se expandiram, houve, em meados do século XX, a necessidade de equipes dedicadas à manutenção. Surgiram os primeiros conceitos de inspeções regulares e manutenção preventiva para identificar e corrigir problemas antes que se tornassem críticos.

Essa evolução das tecnologias de manutenção acompanhou e acompanha os avanços na eletrônica e na tecnologia da informação. Sistemas de diagnóstico mais avançados foram desenvolvidos, permitindo que problemas mecânicos e elétricos fossem identificados com maior precisão. Isso contribuiu para a transição da manutenção reativa (correção de problemas após a ocorrência) para a manutenção preditiva, conhecida por manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento (Pereira, 2009).

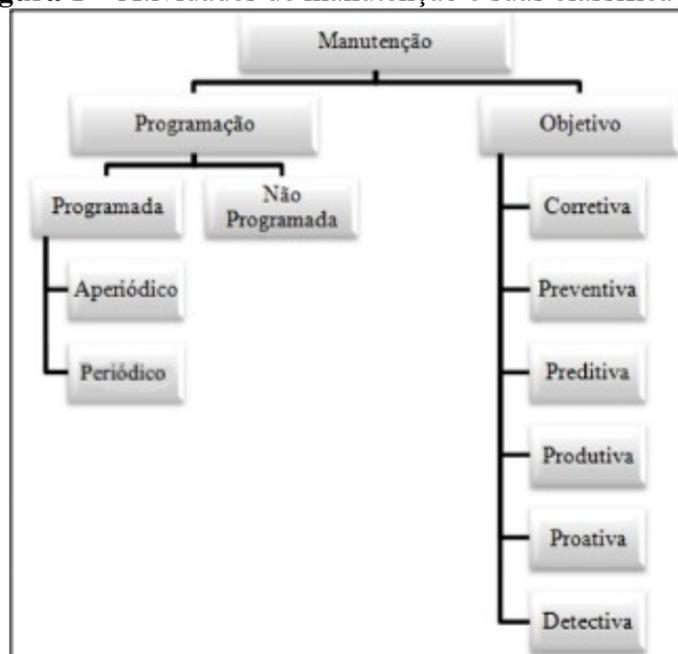
Em consonância com as disposições do CBA, a manutenção de aeronaves envolve uma série de procedimentos críticos para garantir sua segurança e operacionalidade.

No entanto, é importante observar que, nas fases iniciais da aviação, a manutenção muitas vezes gerava uma quantidade considerável de resíduos. Isso ocorria devido ao uso de materiais menos duráveis e à falta de ênfase na reciclagem e no gerenciamento ambiental adequado. Componentes descartados, como peças de motor desgastadas, pneus e fluidos, frequentemente contribuíam para impactos ambientais negativos. À medida que a indústria aeroespacial evoluiu, a conscientização sobre a gestão de resíduos cresceu, levando a práticas mais sustentáveis de manutenção, com ênfase no tripé da sustentabilidade – redução, reutilização e reciclagem de materiais – para minimizar os impactos socioambientais da manutenção aeronáutica (Brandão, 2020).

## 2.1 EVOLUÇÃO DOS PADRÕES DE MANUTENÇÃO

A evolução dos padrões de manutenção na aviação reflete os avanços tecnológicos, a busca por eficiência e o aprimoramento contínuo da segurança operacional. Os diferentes tipos de manutenção, incluindo o *Hard Time*, o *Condition Monitoring* e o *On Condition*, desempenham papéis cruciais na garantia da confiabilidade das aeronaves e na otimização dos processos de manutenção. Sobre isso, Bevictori (2019) *apud* Siqueira (2005) afirma que as atividades de manutenção são classificadas de acordo com a forma de programação e o objetivo de execução das tarefas a serem realizadas, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** – Atividades de manutenção e suas classificações



Fonte: Bevictori (2019) *apud* Siqueira (2005).

Dinis (2009) e Mendes (2011) tratam a manutenção programada periódica (modalidade de programação) e preventiva<sup>3</sup> (modalidade do objetivo) como um conjunto de atividades planejadas, com a intenção de reduzir a probabilidade de falhas nos equipamentos.

O padrão de manutenção *Hard Time* (HT), também conhecido como Tempo Fixo (conceito inserto na modalidade de programação preventiva), foi uma das abordagens iniciais na aviação. O Manual de Certificação Aeronáutica (MCA)<sup>4</sup> 400-15 de (Brasil, 2006) estabelece que uma atividade de manutenção é categorizada como "*Hard Time*" quando envolve a remoção programada de um componente ou item para substituição ou revisão geral, atingindo, assim, um limite máximo de idade especificado pelo fabricante, independentemente de qualquer disfunção aparente no componente ou item (Bevictori, 2019).

Assim, o processo de manutenção HT é aquele em que um limite de uso operacional é estabelecido: o "*Time Between Overhaul*" (TBO) ou "Tempo Limite-de-vida" (TLV) para itens recuperáveis, e o TLV para itens consumíveis. Quando se trabalha com o conceito de TBO, são estipulados valores que determinam quando é necessária uma revisão geral em sistemas e acessórios, como motores, hélices metálicas e outros. Esses limites são definidos com base na vida em serviço fornecida pelo fabricante ou determinada pelo operador. Nesse sistema, a manutenção ocorre em intervalos de tempo predeterminados, independentemente do estado da aeronave. Esses intervalos são baseados na vida útil estimada de componentes críticos, como motores e peças de desgaste (Bevictori, 2019).

Com o avanço da tecnologia, entre as décadas de 1950 e 1960, surgiram dúvidas quanto à eficácia da manutenção preventiva para a redução significativa da probabilidade de falhas nos sistemas complexos das aeronaves. Estudos conduzidos pela United Airlines em 1968 demonstraram que apenas 11% dos componentes e sistemas presentes nas aeronaves poderiam se beneficiar de algum tipo de manutenção preventiva (Moubray, 1997; Nowlan e Heap 1978 *apud* Dinis, 2009).

Assim, surgiu o conceito de *Condition Monitoring*. Diferentemente do método de manutenção *Hard Time*, o *Condition Monitoring* não é um método preventivo. Para os itens submetidos a esse conceito, não se aplicam requisitos de reparação periódica ou substituição, e não existem inspeções ou testes capazes de avaliar seu estado e desempenho. Em vez disso,

---

<sup>3</sup> A manutenção preventiva é considerada uma ação necessária para manter equipamentos, em uma condição operável por meio de serviços periódicos de manutenção e / ou substituição de componentes em intervalos especificados (Pereira, 2009).

<sup>4</sup> Manual cuja finalidade é estabelecer os procedimentos para composição pelo fornecedor e critérios para recebimento de Declaração de Conformidade do Fornecedor (DCF) de Produtos de Controle do Espaço Aéreo (PCEA) (MCA 800-18/2023).

esses componentes ou sistemas são mantidos em operação até que ocorra uma falha, e sua substituição faz parte da Manutenção Não Programada (Kinnison, 2004).

O padrão de manutenção *On Condition*, também conhecido como Condição Atual, é uma extensão lógica do *Condition Monitoring*. Nesse sistema, a manutenção é realizada apenas quando os dados de monitoramento indicam que é necessária. Isso elimina a necessidade de manutenções programadas em intervalos fixos e permite que as aeronaves voem até que os dados de monitoramento sugiram uma intervenção. Além disso, ele é adequado para aeronaves modernas equipadas com sistemas de monitoramento avançados, permitindo maior eficiência operacional, redução dos custos de manutenção e abordagem mais orientada para a segurança.

Conforme descrito na MCA 66-7 (2014) *apud* Bevictori (2019), o processo OC é caracterizado pela avaliação periódica do estado de um sistema ou conjunto em relação a limites especificados, realizada por meio de inspeção visual, testes ou outros métodos físicos adequados que permitam identificar sinais de desgaste ou deterioração, sem a necessidade de desmontagem ou revisão. O uso do processo OC é restrito a sistemas e itens que podem ser avaliados com base em tolerâncias estabelecidas nas orientações técnicas aplicáveis.

Nesse cenário da manutenção de aeronaves no Brasil, é de suma importância compreender, ainda, o papel da legislação brasileira na gestão dos resíduos sólidos desse setor vital da aviação. Notadamente, a Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), desempenha papel decisivo na regulamentação e no direcionamento das práticas de gerenciamento de resíduos sólidos. Ela e outros importantes normativos relacionados à matéria são discutidos no próximo tópico.

### **3 LEGISLAÇÃO APLICÁVEL: A POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS E OUTRAS DISPOSIÇÕES LEGAIS**

A gestão de resíduos gerados durante a operação e a manutenção de aeronaves emergem como preocupações significativas e apresentam desafios notáveis (Pereira, 2009), o que demandou a construção de uma regulamentação e a adoção de políticas públicas que pudessem enfrentar esses desafios e minimizar os danos.

No Brasil, assim como em muitas outras nações, a legislação e as políticas ambientais desempenham papel central na regulamentação das práticas de descarte de resíduos, visando a proteção do meio ambiente e a promoção de práticas sustentáveis. A análise desse contexto

legal e regulatório é essencial para compreender como a indústria da aviação lida com seus resíduos sólidos e como se alinha com as metas nacionais de gestão ambiental.

Nesse sentido, com vistas ao enquadramento jurídico relacionado à gestão de resíduos na aviação, considera-se como principais disposições jurídico-normativas as constantes da Lei nº 7.565/1986 (Código Brasileiro de Aeronáutica), da Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais), da Resolução CONAMA nº 362/2005, da Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos) e da NBR 10.004/2004.

De acordo com o artigo 66 da Lei nº 7.565/1986 – Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA) –, compete à autoridade aeronáutica promover a segurança de voo, devendo estabelecer os padrões mínimos de segurança relativos a projetos, inspeção, manutenção em todos os níveis, reparos e operação de aeronaves, motores, hélices e demais componentes aeronáuticos (Brasil, 1986; Vilela, 2010). Em consonância com as disposições do CBA, a manutenção de aeronaves envolve uma série de procedimentos críticos para garantir sua segurança e operacionalidade.

Adicionalmente, a Lei nº 9.605/1998, conhecida como Lei de Crimes Ambientais, prevê penalidades para atividades que causem danos ao meio ambiente, o que inclui o descarte inadequado de resíduos sólidos. Empresas de manutenção de aeronaves que não estejam em conformidade com as regulamentações ambientais podem enfrentar multas substanciais e outras sanções penais previstas neste dispositivo legal (Brasil, 1998).

Também merece menção a Resolução CONAMA nº 362/2005, que define critérios e procedimentos para o gerenciamento de resíduos sólidos gerados em atividades aeroportuárias e aeronáuticas. Esta resolução, emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), é de extrema importância para a indústria da aviação no Brasil, uma vez que detalha os requisitos específicos para o manejo, a coleta, o transporte e a destinação final de resíduos gerados em atividades aeroportuárias, incluindo a manutenção de aeronaves (CONAMA, 2005).

Já a Lei nº 12.305/2010, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos PNRS – foco de análise mais acurada neste estudo devido à sua relevância –, foi concebida para abordar os desafios ambientais e de saúde pública associados aos resíduos sólidos, com impacto direto na manutenção de aeronaves. A lei exige que empresas e organizações envolvidas na atividade de transporte sigam diretrizes rigorosas, com ênfase na redução, reutilização e reciclagem de resíduos, com vistas à minimização do impacto ambiental (Brasil, 2010).

As determinações da lei englobam responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos, desde a sua concepção até o descarte final dos resíduos gerados, passando

pela coleta seletiva, armazenamento, transporte, logística reversa, redução na geração de resíduos e disposição adequada dos resíduos sólidos, além da necessidade de prevenir a poluição, fomentar a reutilização, promover a reciclagem e a recuperação de materiais. Estabelece-se, ainda, em seus artigos 14, 16 e 18, a responsabilidade de União, Estados e Municípios em elaborar e executar seus planos de resíduos, com vistas à utilização racional dos recursos ambientais, ao combate de todas as formas de desperdício e à minimização da geração de resíduos sólidos (Brasil, 2010). Desta forma, esse marco regulatório busca assegurar que as operações aéreas atendam aos requisitos ambientais e promovam a sustentabilidade da indústria.

A PNRS define, no artigo 3º, inciso XVI, esses resíduos:

XVI – resíduos sólidos: **material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade**, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010, n.p.; grifo nosso).

No mesmo artigo 3º, inciso IV, a lei define quem são os gerenciadores de resíduos sólidos: as “pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo. A política ainda tem como princípio a mitigação dos danos pelo poluidor-pagador. Desse modo, as empresas de manutenção aeronáutica figuram como gerenciadores de resíduos, vale dizer, como poluidoras, sendo juridicamente responsáveis pela degradação ou poluição que vierem a causar (Martins, 2016).

Antes disso, a NBR 10.004/2004, no mesmo sentido, já conceituava os resíduos sólidos no Brasil como:

todos os materiais nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam de **atividades de origem industrial**, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, **de serviços** e de varrição. Consideram-se também resíduos sólidos os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpo d'água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004, n.p.; grifo nosso).

Conjugando os conceitos de resíduos sólidos da PNRS e da NBR nº 10.004/2004, observa-se que elas os definem como aqueles que resultam de atividades de origem industrial

– na qual a indústria da aviação se insere –, bem como o material ou substância resultante de atividades humanas em sociedade – aos quais a manutenção de aeronaves se amolda.

A NBR nº 10.004/2004 ainda classifica esses materiais quanto à sua origem e à sua periculosidade, bem como quanto ao seu grau de periculosidade, dividindo-os em Classe I – perigosos; Classe II – não perigosos; Classe II A – não inertes; e Classe II B – inertes (ABNT, 2004).

Muitos dos resíduos produzidos durante o processo de manutenção aeronáutica nas oficinas e hangares enquadram-se na classificação estipulada pela NBR. O Quadro 1, elaborado por Martins (2016), elenca esses resíduos e os relaciona com as classificação estabelecida pelo normativo:

**Quadro 1** – Resíduos gerados na manutenção aeronáutica e classificação

<b>TIPOS DE RESÍDUOS GERADOS NA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO NBR 10.004/2004</b>
Baterias	Classe I
Borrachas e mangueiras usadas e danificadas	Classe II - B
Eletroeletrônicos (cabos elétricos, circuitos, fusíveis)	Classe I
Embalagens de Óleos Lubrificantes/ Fluidos/Graxa	Classe I
Embalagens Isopor	Classe II – A
Embalagens Plásticas	Classe I – II – A - B
EPI's contaminados	Classe I
Filtros contaminados de malhas de papel e metal	Classe I
Latas de tinta para descarte	Classe I
Lixas e pincéis contaminados	Classe I
Mantas absorventes contaminadas	Classe I
Materiais ABS	Classe I
Material têxtil (poltronas, bancos)	Classe II – A
Óleos Lubrificantes contaminados (Oluc)	Classe I
Panos/ estopas contaminados (óleos/fluidos e graxas)	Classe I
Papel - papelão	Classe I – II – A - B
Partes compostas (fibras de vidros e fibras de carbono)	Classe II – A
Peças metálicas (alumínio – magnésio – ferro)	Classe II – A
Peças não metálicas (plásticos – vidros - acrílico)	Classe II – A
Pilhas e baterias, baterias de chumbo-ácidas	Classe I
Pneus Inservíveis	Classe II - B
Restos de estofamentos (espumas - couro)	Classe II – A
Sobras fitas adesivas	Classe II – A

Fonte: Martins (2016).

A aplicação dessas diretrizes representa um desafio devido à diversidade intrínseca dos materiais utilizados no processo de manutenção, expostos no Quadro 1. Contudo, cabe

lembrar que as organizações de manutenção aérea devem adotar medidas que não somente assegurem o correto gerenciamento e destinação adequada dos resíduos para tratamento, reciclagem ou disposição final, como também devem adotar medidas que minimizem a geração desses resíduos, em conformidade com os termos da PNRS (Brasil, 2010). Tal conformidade não apenas atende aos imperativos legais, mas também contribui efetivamente para a redução do impacto ambiental gerado pela indústria da aviação

Enfrentar esses desafios e cumprir as exigências legais de maneira eficaz não só promove a responsabilidade ambiental das empresas de manutenção de aeronaves, mas também oferece uma oportunidade para a adoção de práticas mais sustentáveis e eficientes. Essa abordagem pode se traduzir em benefícios significativos, não apenas em termos de conformidade legal, mas também na melhoria da eficiência operacional, redução de custos e na contribuição para a preservação ambiental (Brasil, 2010).

Portanto, a adesão rigorosa às normas legais e regulamentações pertinentes é essencial para as organizações envolvidas na manutenção de aeronaves no Brasil. Além de garantir a conformidade legal, a gestão responsável de resíduos sólidos na indústria da aviação contribui para a preservação ambiental, a segurança operacional e a sustentabilidade a longo prazo desse setor fundamental para a economia brasileira.

#### **4 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS NA AVIAÇÃO: IMPACTO, DURABILIDADE E SUSTENTABILIDADE**

Segundo Fontes, Alves e Teixeira (2013, p. 2), o mercado mundial de aviação “contribui para o aumento dos impactos ambientais seja na geração de ruídos e emissão de gases como na geração de resíduos sólidos em todo ciclo de vida da aeronave”. Os autores ainda destacam que, durante os procedimentos de manutenção aeronáutica, vários desses resíduos são gerados, muitos deles perigosos, e a possibilidade de minimização de sua geração consiste também em uma oportunidade de redução de custos de destinação.

Esse cenário requer, mais do que o adequado gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos, uma evolução na concepção dos materiais que compõem as aeronaves, com o propósito de evitar ou diminuir o descarte desses materiais.

Assim, de acordo com Mouritz (2012), a evolução dos materiais utilizados na aviação é um reflexo do constante desejo de aprimorar não somente a segurança e a eficiência, mas também a sustentabilidade das aeronaves. No início da aviação, os materiais empregados na

construção de aeronaves passaram por transformações significativas, resultando em aeronaves mais duráveis, leves e ecologicamente sustentáveis. Desde o princípio da aviação, os pioneiros enfrentaram o desafio de construir aeronaves capazes de voar, utilizando os materiais disponíveis na época, como madeira, tecido, metais leves e, até mesmo, elementos não convencionais, como bambu e papelão. No entanto, esses materiais apresentavam limitações substanciais que influenciaram na viabilidade das aeronaves e na necessidade constante de manutenção. A madeira era um dos principais materiais utilizados nas primeiras aeronaves. Como exemplo, temos a aeronave dos irmãos Wright, que, de acordo com Guerrero (2023, p. 23):

[...] Era um biplano com envergadura de aproximadamente 12 metros e uma fuselagem com uma estrutura de madeira leve. A asa inferior era mais larga que a superior, para dar estabilidade e equilíbrio ao avião. O motor de quatro cilindros e 12 cavalos-vapor impulsionava duas hélices de madeira, que eram acionadas por uma corrente de bicicleta.

Mouritz (2012) ainda elucida que, além da madeira, o tecido era frequentemente utilizado para revestir as estruturas de madeira. Apesar de a madeira ser abundante e relativamente fácil de trabalhar, ela e o tecido apresentavam uma série de limitações quando aplicados em um contexto aeronáutico. O tecido, apesar de ser leve e permitir aero estabilidade, ele era frágil e suscetível a danos causados pelo vento, chuva e impactos. Ele também não oferecia isolamento térmico adequado, o que tornava os voos em altitudes elevadas desconfortáveis para os pilotos. Assim, com o passar do tempo e com o aumento no tamanho dos aviões, foi necessário o uso de materiais estruturalmente melhores e mais leves. Mouritz (2012) explica a transição entre o uso de madeira e tecido para o uso dos metais na construção das aeronaves da seguinte maneira:

A exigência de alta força-peso permaneceu central para a escolha do material, como tinha com aeronaves anteriores, mas outros critérios, como alta rigidez e durabilidade também se tornou importante. Rigidez mais alta permitiu projetos mais elegantes e mais compactos, e, portanto, melhor desempenho. Esses novos critérios não só exigiram novos materiais, mas também o desenvolvimento de novos métodos de produção para transformar esses materiais em componentes de aeronaves (Mouritz, 2012, p. 38).

A introdução de metais leves, como o alumínio, representou um avanço significativo em relação aos materiais tradicionais. O aço, apesar de resistente, é pesado para aplicações em partes estruturais de aviões. Assim, utiliza-se com mais frequência o alumínio desde 1920, devido ao aumento das cargas de pressão nas fuselagens, tamanho das novas aeronaves e

principalmente a sua leveza. O Duralumínio 1 foi o responsável pela utilização do alumínio na aviação a partir de 1920 (Mouritz, 2012 *apud* Rocha, 2020, p. 10).

Devido às limitações dos materiais antigos, a necessidade de manutenção era uma constante, as aeronaves frequentemente requeriam reparos e substituições de peças devido a danos causados pelo uso e pelo ambiente. Assim, com a evolução da aviação, ocorreu uma mudança paradigmática nos materiais utilizados na construção de aeronaves. A transição dos materiais antigos, como madeira e metais leves, para a era dos materiais compostos e ligas avançadas (em meados da década de 70) marcou uma revolução na indústria aeronáutica. Essa transformação não apenas influenciou a eficiência e a segurança das aeronaves, mas também impactou significativamente as operações de manutenção, a durabilidade e a sustentabilidade ambiental, conforme apontado por Aircraft (2020):

Materiais compostos, como fibra de vidro e fibra de carbono, são facilmente moldados em formas complexas e aerodinâmicas. Eles podem criar estruturas muito fortes e tolerantes a grandes variações de temperatura exigindo pouca manutenção. Hoje, o uso de compósitos substituiu o de alumínio em muitas áreas e é encontrado em todas as áreas da aviação, desde aviões até aeronaves esportivas leves - Light Sport Aircraft.

Nota-se, então, que a chegada dos materiais compostos representou, nos dizeres de Rocha (2020), um salto significativo na engenharia de materiais aeronáuticos. Os compósitos são conhecidos por sua incrível relação entre resistência e peso, tornando-os ideais para aeronaves que buscam otimizar o desempenho e a eficiência. A fibra de carbono, um desses materiais mais proeminentes, revolucionou a aviação devido à sua resistência excepcional e peso extremamente leve. Composto por fibras individuais de carbono entrelaçadas, o material é mais forte e mais rígido do que muitos metais, mas com uma fração do peso. Isso resulta em aeronaves que consomem menos combustível, têm maior capacidade de carga e são mais resistentes às tensões do voo. A aplicação da fibra de carbono em partes estruturais, como asas e fuselagens, proporciona, ainda, maior durabilidade e vida útil às aeronaves. Nesse contexto, Disprofiber (2023) aponta:

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras precursoras e ricas em carbono, o poliácridonitrila (PAN). Estas fibras exibem os maiores índices de rigidez entre todas as fibras disponíveis comercialmente, além de resistências muito altas no que se refere à tração, compressão, corrosão e fadiga. Porém, a sua resistência ao impacto é mais baixa que a proporcionada pelas fibras de vidro ou aramida<sup>5</sup> (Disprofiber, 2023).

---

<sup>5</sup> Sobre as fibras de aramida, Dupont (2020) esclarece: “as fibras DuPont Kevlar são usadas em uma variedade de artigos de vestuário, acessórios e equipamentos para torná-los mais seguros e duráveis. Com cinco vezes a resistência do aço com base em um peso idêntico, ela é a fibra preferida em equipamentos de proteção e acessórios” (Dupont, 2020, s.p.).

Em complemento, Callister Jr. (1997) afirma que essas fibras são cuidadosamente incorporadas em camadas, cada uma com orientação específica, para resistir às forças aplicadas durante o voo. Isso reduz significativamente a fadiga estrutural, permitindo que as peças durem mais tempo. Além disso, avanços na tecnologia de laminação, como a laminação a vácuo, garantem que essas peças compostas mantenham sua integridade estrutural ao longo do tempo, elas possuem boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação.<sup>6</sup>

As ligas de alumínio também desempenham um papel crucial na construção de aeronaves modernas. As ligas de alta resistência, como as séries 7000 e 8000<sup>7</sup>, são tratadas termicamente para maximizar sua força e durabilidade. Tecnologias de tratamento térmico avançadas garantem que essas peças alcancem seu máximo potencial de resistência. Além disso, revestimentos protetores, como a anodização<sup>8</sup>, são aplicados para proteger as peças de alumínio contra corrosão e desgaste, prolongando sua vida útil. Sobre essas ligas de alumínio, a *Aviation Maintenance Technician Handbook—General* (2018) discorre:

Os vários tipos de ligas de alumínio podem ser divididos em duas classes gerais: as ligas de fundição (aquelas adequadas para fundição em moldes de areia, moldes permanentes ou fundição em lingotes) e as ligas trabalhadas (aquelas que podem ser moldadas por laminação, estiramento ou forjamento). Na construção de aeronaves as ligas trabalhadas são as mais usadas, sendo utilizadas para longarinas, anteparos, revestimentos, elementos estruturais, rebites e seções extrudadas (FAA, 2018, p. 64).

Essas inovações nos materiais, porém, não se prestam tão somente a promover eficiência e economia para as empresas aéreas, mas também atendem a uma preocupação mundial: a diminuição dos níveis de poluição da atmosfera. Uma das opções das fabricantes foi inovar novamente em materiais, o que permitiu diminuir o peso das aeronaves, tornando-as

---

<sup>6</sup> Alguns desafios a serem considerados: a produção da fibra de carbono pode ser energeticamente intensiva, envolvendo altas temperaturas e pressões que consomem eletricidade e recursos naturais. Todavia, é importante notar que, em muitos casos, os benefícios em termos de economia de combustível e redução de emissões ao longo da vida útil das aeronaves superam amplamente o impacto da produção. Além disso, é importante destacar que há outra alternativa mais eficiente para neutralizar a emissão de carbono é o bioquerosene, composto de hidrocarbonetos com cadeias lineares ou cíclicas, que se assemelham ao querosene fóssil, podendo ser usado em mistura com outro querosene e até mesmo puro (Scaldeferri, 2019).

<sup>7</sup> As ligas de alumínio podem dividir-se em ligas para fundição e em ligas para trabalho mecânico, podendo ou não ser tratadas termicamente. As ligas de alumínio para trabalho mecânico são classificadas de acordo com a sua composição, usando uma designação de quatro dígitos. O primeiro dígito indica o principal elemento de liga, sendo o dígito 1 reservado ao alumínio não ligado, Os dois últimos dígitos indicam a liga de alumínio ou, para o alumínio puro, o grau de pureza. O segundo dígito indica as modificações de composição da liga original ou limites de impurezas. As ligas da série 2xxx,6xxx e 7xxx são as ligas de alumínio tratáveis termicamente (Silva, 2010).

<sup>8</sup> Durante o processo de anodização ocorre espessamento da camada de óxido natural do alumínio  $Al_2O_3$ , produzindo, assim, uma camada protetora altamente impermeável em sua superfície (Araujo *et al.*, 2021).

mais eficientes e econômicas por meio do menor consumo de combustível. O Boeing 787, lançado em 2007, reflete essas inovações:

O 787 foi projetado para ser mais ambientalmente progressivo ao longo do ciclo de vida do produto. O avião é fabricado usando menos materiais perigosos, consome menos combustível e produz menos emissões. O 787 também é mais silencioso para as comunidades aeroportuárias do que qualquer avião anterior. E no final da vida útil do avião, os materiais utilizados para o 787 são recicláveis (Boeing, 2019).

Como visto, o B787, além de propiciar menos contaminação à atmosfera, com menos emissões de gases poluentes, compõe-se de materiais passíveis de reciclagem ao final da sua vida, o que diminui a poluição do planeta. O mesmo ocorre com os aviões da Airbus, cuja proposta de reciclagem vem ganhando espaço no processo produtivo.

Os dois tipos mais usados de CFRP<sup>9</sup> são 'termoset' e 'termoplástico'. Embora os CFRPs termoset sejam atualmente mais difundidos na indústria aeronáutica, os termoplásticos estão ganhando popularidade por causa de sua reciclagem – uma importante consideração do ciclo de vida que tem sido um fator contra a adoção mais ampla do CFRP (Airbus, 2017).

Outro aspecto positivo é que muitos desses materiais modernos são altamente recicláveis. O alumínio, por exemplo, é conhecido por essa característica, e a reciclagem desse material pode economizar uma quantidade considerável de energia em comparação com a produção a partir de minérios brutos. Além disso, materiais compostos estão sendo estudados para possibilitar reciclagem mais eficiente, o que pode melhorar ainda mais a sustentabilidade dos materiais aeroespaciais. Nesse contexto é importante ressaltar que os materiais avançados tendem a ser mais duráveis e resistentes à corrosão, fator apontado por Mouritz (2012) como essencial nas aeronaves. A resistência superior à corrosão desses materiais também reduz a necessidade de manutenção frequente, melhorando a eficiência operacional.

Assim, a adoção de materiais compostos influenciou diretamente as operações de manutenção aeronáutica. A maior durabilidade desses materiais resulta em uma redução na frequência de manutenção necessária em comparação com os materiais antigos, uma vez que diminui o índice de corrosão, degradação esta que custa anualmente à indústria aeronáutica milhões de reais (Peeler, 2002 *apud* Leite 2014). Menos frequência de manutenção não apenas diminui os custos operacionais, mas também aumenta a disponibilidade das aeronaves para voar, beneficiando as companhias aéreas e os passageiros.

---

<sup>9</sup> *Carbon fiber–reinforced polymer (em português, polímero reforçado com fibra de carbono).*

Além disso, os materiais compostos e as ligas avançadas têm um impacto significativo na sustentabilidade ambiental da aviação. A redução no consumo de combustível devido ao peso mais leve das aeronaves contribui para a diminuição das emissões de carbono. A preocupação é legítima, uma vez que, de acordo com a IATA, estima-se que em 2019 a indústria da aviação emitiu 915 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, o que representa 2% das emissões totais de carbono do mundo (IATA, 2021). Além disso, a maior durabilidade dos materiais também resulta em vida útil prolongada das aeronaves, reduzindo a quantidade de resíduos e a necessidade de produzir novas aeronaves com frequência.

No entanto, não basta apenas selecionar os materiais certos: é igualmente importante monitorar constantemente sua condição ao longo do tempo. É aí que entram as tecnologias de Inspeção Não Destrutiva (NDI), como ultrassom e raios-X. Essas técnicas permitem a detecção de defeitos internos invisíveis a olho nu, garantindo que as peças mantenham sua integridade estrutural. Adicionalmente, podem prever a integridade do material e a confiabilidade estrutural, possibilitando a priorização do ciclo de reparos na indústria da construção aeronáutica (Miranda, 2011 p. 54).

O monitoramento em tempo real – espécie de inspeção feita pelos sistemas da aeronave – também tem desempenhado um papel cada vez mais importante. Sistemas de sensores de carga e tensão permitem que as aeronaves monitorem continuamente a integridade das peças em operação. Isso possibilita a detecção precoce de problemas e a realização de manutenção preventiva antes que ocorram falhas, reduzindo a necessidade de manutenções corretivas caras e prolongando a vida útil das aeronaves (Eduardo, 2003).

Barboza esmiúça as modalidades de manutenção, conceituadas no início deste estudo, e ressalta as suas características de acordo com a época em que elas prevalecem.

**Quadro 2** – Evolução dos tipos de manutenção no tempo e suas características

<b>Período (anos)</b>	<b>Tipo de manutenção</b>	<b>Características</b>
1750-1914	Manutenção improvisada	Tipo "quebra-repara"
1914-1930	Manutenção Corretiva	Sem planejamento, sem controle
1930-1950	Manutenção Preventiva + Corretiva	Com planejamento, sem controle
1950-1970	Engenharia de Manutenção	Com planejamento, com controle
1970- Atualidade	Manutenção Preditiva	Análise de sintomas; análise estatística; processamento digital de dados
Futuro	Manutenção Preditiva Contínua	Medição contínua de sintomas com centros de diagnósticos

Fonte: Barboza (2018).

Com efeito, a manutenção deve estar em constante evolução, uma vez que os materiais na indústria aeroespacial têm tido impacto significativo no meio ambiente, com benefícios e desafios a considerar.

Assim, observa-se que a evolução contínua dos materiais na indústria aeroespacial e o desenvolvimento dos padrões de manutenção aeronáutica têm sido fundamentais na mitigação do descarte inadequado e no impulso à sustentabilidade ambiental. Exemplos notáveis incluem, repita-se, os avanços nas fibras de carbono e aramida, altamente resistentes e duráveis. Isso se traduz em vida útil mais longa das peças e dos componentes das aeronaves, reduzindo a necessidade de substituições frequentes e, conseqüentemente, minimizando o descarte de materiais.

Além disso, o esforço constante na pesquisa e no desenvolvimento de técnicas de reciclagem para materiais compostos, como a fibra de carbono, destaca o compromisso da indústria em encontrar soluções sustentáveis para o descarte, contribuindo para uma gestão mais responsável dos resíduos aeroespaciais. Essas inovações não apenas aprimoram o desempenho das aeronaves, mas também alinham a indústria da aviação com os princípios da preservação ambiental.

Conclui-se então que a evolução destes materiais na aviação demonstra melhorias significativas no contexto do descarte incorreto e seu impacto ambiental, com a ênfase na redução de peso, durabilidade e eficiência. A utilização desses materiais avançados tem contribuído, ainda, para reduzir o consumo de combustível e as emissões de carbono e prolongar a vida útil das aeronaves. Portanto, o uso desses materiais representa um passo importante na direção de uma aviação mais ecologicamente responsável, em consonância com os esforços globais para mitigar os impactos ambientais da indústria aeroespacial.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao longo desta pesquisa, exploraram-se diversos aspectos da manutenção de aeronaves, desde a evolução dos materiais utilizados até o impacto ambiental positivo dessas mudanças. Inicialmente, discutiu-se a introdução do avião como uma máquina complexa, destacando o desafio constante que a aviação representa desde o princípio. Em seguida, apresentou-se um breve panorama da história da aviação, analisando o desenvolvimento dos primeiros aviões e como a busca por inovações impulsionou a evolução da manutenção de aeronaves.

A exploração do conceito de manutenção ao longo da história da aviação revelou como a manutenção sempre foi uma preocupação central para garantir a segurança e o funcionamento eficaz das aeronaves. No entanto, também se observou como a evolução dos materiais, dos padrões de manutenção e das regulamentações desempenharam um papel crucial na melhoria das práticas de manutenção e na redução do impacto ambiental.

No tópico sobre a evolução dos materiais, discutiu-se como os materiais avançados, como compósitos de fibra de carbono e ligas de alumínio de alta resistência, estão contribuindo para prolongar o tempo de utilização das aeronaves. Esses materiais são mais leves, duráveis e resistentes à corrosão, reduzindo a frequência de substituições e, assim, minimizando o descarte de componentes aeroespaciais.

Além disso, foi notável que a reciclagem de materiais aeroespaciais, em particular materiais compostos, é um desafio em comparação com o alumínio, mas estão em desenvolvimento soluções para torná-la mais eficiente. Por fim, foi possível concluir como esses avanços materiais contribuem para a redução do impacto ambiental, uma vez que a aviação busca se alinhar com as metas de sustentabilidade. A indústria aeroespacial, ao adotar materiais mais eficientes e práticas de manutenção responsável, está desempenhando um papel importante na busca por uma aviação mais ecologicamente responsável.

Logo, a evolução dos materiais na manutenção de aeronaves desempenha um papel fundamental na redução do impacto ambiental através da mitigação do descarte de resíduos. A combinação de materiais avançados, práticas de manutenção eficientes e regulamentações ambientais adequadas está pavimentando o caminho para uma aviação mais sustentável, capaz de enfrentar os desafios ambientais do século XXI.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004/2004**. Resíduos sólidos – Classificação. Solid Waste – Classification. Rio de Janeiro, 2004, 71p.

AIRCRAFT, Cirrus. **This choice is simple**. 2020. Disponível em: <http://www.whycirrus.com>. Acesso em: 15 set. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Fuselagem**. 2021. Disponível em: [https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por\\_por/tr1289.htm](https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_por/tr1289.htm). Acesso em: 23 ago. 2023.

AIRBUS. **Composites**: Airbus continues to shape the future. 2017. Disponível em: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/08/composites--airbus-continues-to-shapethe-future.html>. Acesso em: 6 out. 2023.

ARAUJO, João V. de Sousa; SILVA, Rejane M. P. da; KLUMPP, Rafael E.; COSTA, Isolda. O processo de anodização do alumínio e suas ligas: uma abordagem histórica e eletroquímica, **Química Nova**, v. 44, p. 999-1011, 2021.

AZEVEDO, Thalles M. Q. de Paula. **Avaliação do comportamento da aderência de um novo sistema de compósito laminado para reforço em estrutura de concreto**. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2021.

BARBOZA, Tiudorico Leite. Um histórico da manutenção e conceitos sobre sua função. **Revista Marítima Brasileira**, v. 138, n. 10/12, 2018.

BEVICTORI, Luis F. N.; ALVES, Alessandro. F. Análise comparativa das filosofias de manutenção Hard Time e On Condition. **Interação, Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 19, n. 1, p. 201 - 214, 4 mar. 2019.

BOEING. **Boeing 787 dreamliner by design**. 2019. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/lower-cabin-altitude>. Acesso em: 19 out. 2020.

BRANDÃO, Ana Beatriz de Souza Gomes; CONTREIRAS, Mariana da Silva Melo N.; CESAR, Fátima Cristina Conceição de Gouvêa. **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos**: um estudo de caso do Departamento de Controle do Espaço Aéreo. DECEA: Brasília, 2020.

BRASIL. **Lei nº 7.565, de 19 de dezembro de 1986**. Dispõe sobre o Código Brasileiro de Aeronáutica (CBA). Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7565compilado.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7565compilado.htm). Acesso em: 11 out. 2023.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm). Acesso em: 14 out. 2023.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **MCA400-15: Manutenção Centrada na Confiabilidade**, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). European Commission. Disponível em [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 15 out. 2023.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **MCA66-7: Manual de Manutenção Doutrina, Processos e Documentação de Manutenção**. Brasília, 2014.

CALLISTER JR.; William. D. **Materials Science and Engineering**. Nova York: Ed. John Wiley & Sons. Inc, 1997.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 362, de 23 de junho de 2005**. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=102246>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

DINIS, Duarte Nunes C. C. **Análise do Line Maintenance Manual numa perspectiva de melhoria contínua do Programa de Manutenção Avião**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2009.

DIPROFIBER. **Fibra de carbono**. 2023. Disponível em: <http://diprofiber.com.br/fibra-de-carbono/>. Acesso em: 15 out. 2023.

DIPROFIBER. **Materiais de núcleo**. 2023. Disponível em: <http://diprofiber.com.br/materiais-de-nucleo/>. Acesso em: 15 out. 2023.

DUPONT. **Fibra de Aramida**. 2020. Disponível em: <http://www.dupont.com.br/fabrics-fibers-and-nonwovens/kevlar-for-aerospace.html>. Acesso em: 26 out. 2023.

EDUARDO, Alexandre C. **Diagnóstico de defeitos em sistemas mecânicos rotativos através da análise de correlações e redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas (Unicamp), 2003.

FAA. **Aviation Maintenance Technician Handbook—General (FAA-H-8083-30A)**. Oklahoma: U.S. Department of Transportation, 2018.

FONTES, Charles Oliveira; ALVES, José Ferreira; TEIXEIRA, Cláudia Echevengúá. **Minimização de resíduos em um processo de manutenção de aeronaves: abordagens seis sigma, lean manufacturing e produção mais limpa**. International Workshop Advances In Cleaner Production. São Paulo, 2013.

GUERRERO, Emerson do Carmo. **História da aviação: o legado de Alberto Santos Dumont e dos irmãos Wright**. 2023. Disponível em: [http://faef.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/WydybjUDpYtjIL4\\_2013-5-23-10-51-57.pdf](http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/WydybjUDpYtjIL4_2013-5-23-10-51-57.pdf). Acesso em: 20 ago. 2023.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Annual Report 2009**: Kuala Lumpur/MA.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **Annual Safety Report Executive Summary 2022**. Contributing Factors. Edition 59. Montreal/CA. 2023. Disponível em: <https://www.iata.org/en/publications/safety-report/executive-summary/>. Acesso em: 15 out. 2023.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). **IATA Climate change FAQ**. 2021. Disponível em: [https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact\\_sheet\\_on\\_climate\\_change.pdf](https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet_on_climate_change.pdf). Acesso em: 10 nov. 2023.

JORGE, Fernando. **As lutas, a glória e o martírio de Santos Dumont**. Rio de Janeiro: Harpercollins, 2018. 512p.

KINNISON, Harry. **Aviation Maintenance Management**. United States: McGraw-Hill, 2004.

LEBRAO, Guilherme Wolf. Fibra de carbono. **Revista Plástico Sul**, v. 3, 2008.

PEELER, Deborah T. Comprehensive damage management of the aging fleet: the evolution of anticipate and manage technologies. *In: Joint Faa/Dod/Nasa Aging Aircraft Conference*, San Francisco, 2002. *In: LEITE, Vinicius Reis. Estado da arte dos materiais compósitos na indústria. Departamento de Engenharia Mecânica, Taubaté, v. 20, 2014.*

LEMOS, Valmir. **História da aviação**. Design instrucional por Marina Melhado Gomes da Silva. Palhoça: UnisulVirtual, 2012, 282 p. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/21958/1/fulltext.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2023.

MARTINS, Luis Antonio. **Gestão de resíduos nos hangares e oficinas de manutenção aeronáutica**: uma questão à margem da regulação Anac. TCC (Graduação em Gestão de Manutenção de Aeronaves) – Universidade Estácio de Sá. São José dos Campos/SP, 2016. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://www.pilotopolicial.com.br/wp-content/uploads/2016/09/Gest%C3%A3o-de-Res%C3%ADuos-nos-Hangares-e-Oficinas-de-Manuten%C3%A7%C3%A3o-Aeron%C3%A1utica.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

MENDES, Angélica A. **Manutenção Centrada em confiabilidade**: uma abordagem quantitativa. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2011.

MIRANDA, Marcos. **Comparação entre métodos de inspeção não destrutiva aplicados a peças compósitas laminadas sólidas estruturais aeronáuticas**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos/SP, 2011.

MOUBRAY, John. **Reliability-Centered Maintenance**. Segunda edição, Industrial Press Inc., New York, 1997.

MOURITZ, Adrian P. **Introduction to aerospace materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. 1036 p. Disponível em: <https://pt.scribd.com/read/282656648/Introduction-to-Aerospace-Materials#>. Acesso em: 20 out. 2020.

NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard F. **Reliability-Centered Maintenance**. Report A066-579, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, 1978.

NARDI, Anamaria B.; FOFANKA, Luciana. **Monitoramento de aspectos ambientais em uma companhia aérea no Aeroporto Internacional Salgado Filho**. Educação Ambiental em Ação, Porto Alegre, n. 38, 2011. Disponível em: <https://www.revistaea.org/pf.php?idartigo=1156>. Acesso em 10 set. 2023.

OLIVEIRA, Alan Cristian Bagestan. **Desenvolvimento conceitual de uma aeronave de competição da SAE Brasil**. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

PEREIRA, Mário J. **Engenharia de manutenção**: teoria e prática. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

RANKIN, William. MEDA Investigation Process. **Boeing AERO**, Issue 26, Quarter 02, 15-21, 2007.

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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Campus Universitário. Lagoa Nova, Natal, RN, 2020, 42 p.

MOURITZ, Adrian P. **Introduction to aerospace materials**. Cambridge: Woodhead Publishing Limite, 2012. 1036 p. *In*: ROCHA, Denis Rodrigues da. **Estruturas de aeronaves: análise do aumento da utilização de materiais compósitos**. Monografia (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2020.

SCALDAFERRI, Cristiane Almeida. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para a produção de bioquerosene de aviação e diesel verde**. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais. Repositório UFMG. Belo Horizonte/MG, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-BAUPRS>. Acesso em: 01 out. 2023.

SILVA, Odair Vieira da; SANTOS, Rosiane Cristina dos. Trajetória histórica da aviação mundial. **Revista Científica Eletrônica de Turismo**, v. 11, 2009. Disponível em: [http://faef.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/WydybjUDpYtjIL4\\_2013-5-23-10-51-57.pdf](http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/WydybjUDpYtjIL4_2013-5-23-10-51-57.pdf). Acesso em: 20 ago. 2023.

SIQUEIRA, I. Patriota de. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

SILVA, Natércia Fernanda Almeida da. **Ligas de alumínio para o fabrico de rodas de bicicletas**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade do Porto/Portugal, 2010.

VILELA, João Alexandre Braga Maciel. Manutenção em aeronaves: fator contribuinte para a segurança de aviação. **Conexão Sipaer**, Revista Científica de Segurança de Voo, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 85-99, 2010.

Contato: (062) 98232.0233  
E-mail: osmarpaulo38@gmail.com



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS  
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1089 • Setor Universitário  
Caixa Postal 86 • CEP 74605-010  
Goiânia • Goiás • Brasil  
Fone: (52) 3945.1000  
www.pucgoias.edu.br • reitoria@pucgoias.edu.br

## RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

### ANEXO I

#### APÊNDICE ao TCC

#### Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante Ismael Paulo de Freitas Vieira Reis  
do Curso de Ciências Aeronáuticas, matrícula 2020.1.0047.0006-6,  
telefone: (62)-98232-0233 e-mail ismaspaulo38@gmail.com,  
na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei  
dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás)  
a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado  
A evolução dos materiais e dos padrões de manutenção aeronáutica como fator  
de mitigação, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos,  
conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de  
computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som  
(WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da  
área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção  
científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 15 de dezembro de 2023.

Assinatura do autor: Reis

Nome completo do autor: Ismael Paulo de Freitas Vieira Reis

Assinatura do professor-orientador: André Luiz S. Gonçalves

Nome completo do professor-orientador: André Luiz S. Gonçalves