

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**KATTY ANNE RODRIGUES DE PAULA
MANUELE SOUSA SANTOS
MICHAEL JESUS DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE INSPEÇÃO NÃO
DESTRUTIVO E MONITORAMENTO DA SAÚDE
ESTRUTURAL (SHM) PARA ESTRUTURA AERONÁUTICA**

São José dos Campos
2025

**KATTY ANNE RODRIGUES DE PAULA
MANUELE SOUSA SANTOS
MICHAEL JESUS DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE INSPEÇÃO NÃO
DESTRUTIVO E MONITORAMENTO DA SAÚDE
ESTRUTURAL (SHM) PARA ESTRUTURA AERONÁUTICA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

Orientador: Me. Luiz Alberto Nolasco Fonseca

São José dos Campos
2025

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

PAULA, Katty Anne Rodrigues

Análise de métodos de inspeção não destrutivo e monitoramento da saúde estrutural (shm) para estrutura aeronáutica. / Katty Anne Rodrigues de Paula, Manuele Sousa Santos, Michael Jesus dos Santos – São José dos Campos, 2025.

39f.

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Projeto de Estruturas Aeronáutica Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2025.

Orientador: Me. Luiz Alberto Nolasco Fonseca

1. Ensaaios não destrutivos 1. 2. Estruturas aeronáuticas 2. 3. Monitoramento Estrutura SHM 3 I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PAULA, K. A. R.; SANTOS, M, S.; SANTOS, M. J. **Análise de métodos de inspeção não destrutivo para estrutura aeronáutica.** 2025. 39f Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Projeto de Estruturas Aeronáutica - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2025.

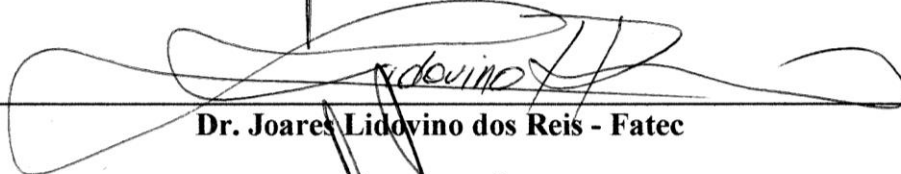
**KATTY ANNE RODRIGUES DE PAULA
MANUELE SOUSA SANTOS
MICHAEL JESUS DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE MÉTODOS DE INSPEÇÃO NÃO
DESTRUTIVO E MONITORAMENTO DA SAÚDE
ESTRUTURAL (SHM) PARA ESTRUTURA AERONÁUTICA**

Trabalho de Graduação apresentado
Faculdade de Tecnologia de São José do
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estrutura
Aeronáuticas.



Me. Luiz Alberto Nolasco Fonseca - Fatec



Dr. Joares Lidovino dos Reis - Fatec



Me. Roque Antônio de Moura - Fatec

27 / 11 / 2025

DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente a Deus pela saúde, força e sabedoria concedida durante esta jornada de estudos. À nossas famílias por todo apoio, amor, incentivo e compreensão nos momentos de dificuldade.

Ao nosso orientador Me. Luiz Alberto Nolasco Fonseca, pela orientação, paciência disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

A todos professores do curso de Projetos de Estruturas Aeronáuticas, aos colegas e amigos que fizeram parte desta jornada compartilhando desafios, experiências e conquistas.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar as principais técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) aplicadas à inspeção de estruturas aeronáuticas, destacando suas características, vantagens, limitações e contribuições para a segurança e a eficiência operacional. Por meio de uma revisão bibliográfica e análise técnica, são abordados métodos amplamente utilizados na aviação, como Ultrassom, Correntes Parasitas, Líquido Penetrante, Partículas Magnéticas e Radiografia Industrial, bem como tecnologias emergentes de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM), representadas pelos sistemas de Monitoramento Comparativo de Vácuo (CVM) e Transdutores de Onda (Lamb Waves – LW). O estudo evidencia que os END tradicionais permanecem indispensáveis devido à sua precisão e confiabilidade, enquanto as tecnologias de SHM surgem como ferramentas complementares, capazes de proporcionar monitoramento contínuo e preditivo. Testes realizados pela Embraer demonstram a viabilidade dessas inovações, com destaque para a detecção precoce de falhas e a redução de custos e tempo de manutenção. Conclui-se que a integração entre métodos convencionais e sistemas inteligentes de monitoramento representa um avanço significativo rumo à manutenção baseada em condição, promovendo maior segurança, eficiência e disponibilidade operacional das aeronaves.

Palavras-Chave: Ensaios não destrutivos; Estruturas aeronáuticas; Monitoramento estrutural; SHM

ABSTRACT

This study aims to analyze the main Non-Destructive Testing (NDT) techniques applied to the inspection of aeronautical structures, highlighting their characteristics, advantages, limitations, and contributions to safety and operational efficiency. Through bibliographic review and technical analysis, the research addresses widely used methods in aviation, such as Ultrasonic Testing, Eddy Current, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, and Industrial Radiography, as well as emerging Structural Health Monitoring (SHM) technologies represented by Comparative Vacuum Monitoring (CVM) and Lamb Wave (LW) transducers. The study demonstrates that traditional NDT methods remain essential due to their accuracy and reliability, while SHM technologies arise as complementary tools capable of providing continuous and predictive monitoring. Tests conducted by Embraer confirm the feasibility of these innovations, emphasizing early fault detection and the reduction of maintenance time and costs. It is concluded that the integration of conventional inspection methods with intelligent monitoring systems represents a significant advancement toward condition-based maintenance, promoting higher safety, efficiency, and operational availability of aircraft..

Keywords: Non-destructive testing; Aeronautical structures; Ultrasonic testing; Eddy current; Structural monitoring; SHM.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivo Geral	9
1.2. Objetivos Específicos	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1. O que é END	11
2.2. ATA MSG-3	11
2.3. Tipos de ENDS	12
2.3.1. Ensaio Visual (EV)	12
2.3.2. Ultrassom	13
2.3.3. Correntes parasitas	14
2.3.4. Termografia infravermelha	15
2.3.5. Emissão acústica	16
2.3.6. Ensaio por Líquido Penetrante (LP)	17
2.3.7. Sensores para monitoramento de saúde estrutural (SHM).....	18
3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	21
3.1. Métodos de Inspeção Não Destrutivos na Indústria Aeronáutica.....	21
3.1.1. Inspeção por Ultrassom (US).....	21
3.1.2. Inspeção por Correntes Parasitas (Eddy Current - EC)	21
3.1.3. Inspeção por Partículas Magnéticas (PM) e Líquidos Penetrantes (LP)	22
3.1.4. Inspeção por Radiografia Industrial (RI)	22
3.1.5. Regulamentação e Qualificação de Pessoal em END.....	22
3.1.6. Qualificação e Certificação profissional.....	23
3.2. Tecnologias em Desenvolvimento	24
3.2.1. Monitoramento de Vácuo comparativo (CVM):	25
3.2.2. Transdutores de onda (LW):	25
3.2.3. Impedância eletromecânica (EMI):	26
3.2.4. Emissão acústica (AE):	27
3.3. Resultados Obtidos em Testes	27
3.4. Discussão e Comparação dos Métodos.....	27
3.5. Exemplos de Aplicação Prática	28
3.5.1. Exemplos de Plataformas e Aplicações do SHM na Embraer.....	28
3.5.2. Aeronaves de Teste de Voo da Família E-Jets	28
3.5.3. Parcerias em Aeronaves em Serviço (Aeronaves em serviço)	29
3.5.4. Outras Aplicações de Pesquisa	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1. Análise dos Ensaios e Tecnologias de Monitoramento Estrutural	31
5. CONCLUSÃO.....	36
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

Os Ensaaios Não Destrutivos (END) emergem como uma ferramenta fundamental na avaliação da integridade de materiais e estruturas, permitindo a detecção de falhas e descontinuidades sem comprometer a funcionalidade dos componentes inspecionados. Com a crescente complexidade das aplicações industriais e a necessidade de garantir a segurança e a confiabilidade dos produtos, as técnicas de END têm se tornado cada vez mais relevantes em setores críticos, como o petroquímico, siderúrgico, aeronáutico e nuclear (HELLIER, 2013; ABNT, 2003).

A importância dos END reside na sua capacidade de identificar problemas potenciais em estágios iniciais, evitando falhas catastróficas que poderiam resultar em acidentes, perdas financeiras e danos à reputação das empresas. Além disso, a aplicação dessas técnicas contribui para a otimização de processos, permitindo que as organizações realizem manutenções preditivas e minimizem paradas não programadas (SILVA, 2019).

Diversas metodologias de END estão disponíveis, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas. Entre as mais comuns, destacam-se a ultrassom, a radiografia, os líquidos penetrantes, partículas magnéticas e sistemas de monitoramento estrutural. No entanto, a eficácia de um único método pode ser limitada por fatores como a geometria do material, a natureza das descontinuidades e as condições ambientais. Por essa razão, a combinação de diferentes técnicas é frequentemente recomendada para garantir uma avaliação mais abrangente e precisa (MOURA, 2021; HELLIER, 2013).

1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as principais técnicas de ensaios não destrutivos, discutindo suas aplicações, vantagens e limitações. Além disso, será abordada a importância da inovação tecnológica e dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento na área de inspeção, visando atender as crescentes exigências da indústria moderna. Ao final, espera-se que o leitor adquira uma compreensão sólida sobre o tema, capacitando-o a aplicar esse conhecimento em contextos acadêmicos e profissionais.

1.2. Objetivos Específicos

O objetivo específico do trabalho é analisar as principais técnicas de Ensaios não destrutivos e sua aplicação na qualidade e controle de materiais e estruturas aeronáuticas.

- Apresentar os principais tipos de ensaios não destrutivos (END): descrever técnicas como ultrassom, radiografia, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e destacando seus princípios de funcionamento e aplicações;
- Analisar a aplicabilidade dos END na indústria: investigar em quais setores industriais (aeronáutico, petroquímico, automobilístico, construção civil). Os ensaios são mais utilizados e por quê;
- Comparar os métodos de END quanto à eficácia, custo e limitações: identificar vantagens e desvantagens de cada técnica para diferentes tipos de materiais e defeitos;
- Estudar as normas e regulamentações técnicas que regem os END: apresentar os principais padrões normativos (como ABNT, ASME, ASTM, ISO) e sua importância na padronização dos procedimentos;
- Demonstrar a importância dos END na garantia da qualidade e segurança: discutir como os ensaios contribuem para a prevenção de falhas e acidentes em estruturas e equipamentos;

A Figura 1 demonstra o fluxo dos objetivos específicos.

Figura 1 Fluxograma dos objetivos específicos.



Fonte: Autores (2025)

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica apresenta os conceitos e princípios que sustentam a compreensão dos Ensaios Não Destrutivos (END) e sua relevância na aviação. São abordadas as principais normas e metodologias aplicadas, como a ATA MSG-3, além dos diferentes tipos de ensaios utilizados para garantir a integridade estrutural de aeronaves. Esta seção busca estabelecer a base conceitual necessária para a análise e aplicação prática dos métodos de inspeção estudados.

2.1. O que é END

Segundo Hellier (2013, p. 5) “Os ensaios não destrutivos são métodos utilizados para examinar materiais ou componentes de forma a não comprometer sua integridade ou funcionalidade, sendo essenciais para garantir a segurança e confiabilidade em setores críticos como a aviação”.

Devido a diversidade de matérias que compõe a estrutura das aeronaves como combinação de ligas metálicas leves (alumínio e o titânio) e também materiais compósitos, com isso é necessários métodos específicos de inspeção que seja capaz de identificar desde danos superficiais como trincas até delaminação em materiais compósitos. As normas técnicas e especificações de qualidade exige que seja aplicado END nos processos de fabricação afim de detectar falhas como fadiga, corrosão e desgaste.

De acordo com o manual da ASNT – American Society for Nondestructive Testing (ASNT, 2015), os END são essenciais para:

- Garantir a segurança de operação de equipamentos.
- Evitar paradas inesperadas de produção.
- Reduzir custos com retrabalho e manutenção corretiva.
- Atender exigências normativas e legais.

2.2 ATA MSG-3

A metodologia MSG-3 (Grupo diretor de Manutenção – 3) foi desenvolvida em 1980 pela Associação de Transporte Aéreo (ATA) em parceria com as companhias aéreas e autoridades reguladoras como FAA, com o objetivo de estabelecer um processo lógico e estruturado para a elaboração de programas de manutenção aeronáutica baseados na análise das consequências de falhas. Diferentemente das versões anteriores (MSG-1 e MSG-2), a MSG-3

adotou uma abordagem orientada à confiabilidade e à segurança operacional, permitindo a definição de tarefas de manutenção eficazes e economicamente viáveis para estruturas, sistemas e zonas da aeronave. A partir da revisão 2009.1, o método passou a incluir o conceito de Monitoramento de integridade estrutural programado (S-SHM), reconhecendo o uso de sensores e técnicas contínuas de monitoramento estrutural como forma válida de inspeção, desde que comprovadamente eficazes. Essa atualização abriu espaço para a integração de ensaios não destrutivos (END), especialmente em aeronaves modernas, onde tecnologias como ultrassom, corrente parasita e monitoramento por fibra óptica vêm sendo utilizadas como ferramentas de inspeção em conformidade com os critérios da MSG-3 (SKYBRARY, 2021).

2. 3. Tipos de ENDS

Existem diversas técnicas de END disponíveis, conforme a necessidades e particularidade de material e geometria da peça com aplicações específicas, acessibilidade e tipo de defeito investigado.

2. 3.1. Ensaio Visual (EV)

O Ensaio Visual é o método mais simples e amplamente utilizado conforme Figura 2. Realizado com auxílio de ferramentas como lupas, câmeras e boroscópio, permite detectar descontinuidades superficiais como trincas, poros e descontinuidades geométricas (CHELL, 2016). Alguns defeitos são visíveis e óbvios e não precisam de inspeções adicionais, porém a falta de defeitos visíveis não significa que não seja necessário realizar inspeções adicionais. Alguns defeitos podem se encontrar abaixo da superfície, e serem pequeno a ponto que o olho humano, mesmo com uso de lupas não seja capaz de detectar.

Figura 2: Mecânicos fazendo inspeção visual em aeronave.



Fonte: Sest Senat (2025)

2.3.2. Ultrassom

Ideal para detectar falhas internas através de propagação de ondas ultrassônicas, como descontinuidades volumétricas ou delaminações em materiais compósitos. É altamente sensível e adequado para controle de qualidade em soldas e peças metálicas de grande espessura (KRAUTKRÄMER e KRAUTKRÄMER, 1990).

A medição se baseia por uma técnica onde um dispositivo emite ondas ultrassônicas em direção à superfície ou região que será analisado conforme a Figura 3. As ondas atravessam o material e refletem de volta ao transdutor. Esse tempo que as ondas levam entre atingir o material e retornar é medido com precisão, permitindo o cálculo da espessura do material.

- É uma medição não destrutiva permitindo que continuem em uso após a medição.
- Tem uma alta precisão na medição da espessura.
- Pode ser utilizada em diversas peças de diferentes materiais metálicos e compósitos.

Figura 3 Inspeção realizada com ultrassom.



Fonte: Aeronave2014 (2025)

2.3.3. Correntes parasitas

Utilizadas principalmente na inspeção de superfícies metálicas para detecção de trincas superficiais conforme a Figura 4. As correntes parasitas são correntes elétricas induzidas em materiais condutores que quando expostos a campos magnéticos a corrente flui através do metal gerando seu próprio campo magnético. Esse tipo de ensaio é muito vantajoso pois pode ser realizado sobre superfícies pintadas e revestimentos fino. É possível detectar defeitos superficiais como corrosão trincas em estágio inicial, seus resultados são obtidos em tempo real. Muito utilizado para medir e avaliar espessura de chapas metálicas. Os equipamentos que realizam este ensaio são leves de fácil transporte e manuseio, e não apresentam risco de radiação. Para realizar o ensaio não necessita de muito preparo da superfície, precisa somente de uma limpeza superficial.

Figura 4 Inspeção realizada aparelho de correntes parasitas.



Fonte: Aerospace (2025)

2.3.4. Termografia infravermelha

Método que analisa variações de temperatura na superfície do material utilizando um aparelho infravermelho com câmeras especiais que fazem a captação de radiação na Figura 5 é possível ver um aparelho de termografia infravermelho, esse tipo de ensaio é muito útil na detecção de descolamentos e defeitos em estruturas compostas, avaliação de peças e componentes em operação sem precisar parar as máquinas, avaliação rápida de áreas grandes. É amplamente utilizada nos setores aeronáuticos, automobilístico e manutenção preditiva para realizar inspeção de materiais e componentes, no qual permite detecção de defeitos superficiais e sub superficiais por meio da análise de variações térmicas, proporcionando uma avaliação rápida e segura sem a necessidade de contato físico. Porém ele possui algumas limitações no momento de sua análise fatores externos podem influenciar nos seus resultados como exemplo: iluminação e ventilação, possui uma limitação na profundidade de detecção.

Figura 5 Aparelho de infravermelho.



Fonte: ngd.ufsc (2025)

Aplicação:

Em materiais Compostos identificando delaminações, descontinuidade e danos por impacto em estruturas.

- Monitoramento de sistemas elétricos e mecânicos para detectar pontos de aquecimento anormais que possa indicar falhas.
- Verificações de uniformidade durante o processo produtivo como cura de materiais compósitos e soldas.
- Avaliação e ensaios de componentes de peças críticas como turbinas e sistemas hidráulicos.

2.3.5. Emissão acústica

A técnica de emissão acústica permite a detecção precoce de falhas estruturais em componentes aeronáuticos, contribuindo para a segurança e eficiência das aeronaves (MILLER, HILL, MOORE, 2005). Ela se baseia na detecção de ondas elásticas geradas por processos internos, como propagação de trincas ou deformações que ocorrem em materiais sob estresse. As ondas são captadas por sensores piezoelétricos, permitindo a identificação de falhas em tempo real, a Figura 6 mostra o aparelho utilizado para fazer o ensaio acústico.

Figura 6 Aparelho de emissão acústica.



Fonte: Inspesolda (2025)

Aplicação:

- Monitoramento de estruturas compostas identificando delaminações e microtrincas em asas, fuselagens e estabilizadores.
- Identificação de propagação de trincas em ligas metálicas submetidas a ciclos de carga como exemplo trens de pouso e suportes estruturais.
- Monitoramento de vazamento ou falhas em tanques e sistemas pressurizado.
- Análise de comportamentos estruturais durante testes em voo, contribuindo para validação de projetos e manutenção preventiva.

2.3.6. Ensaio por Líquido Penetrante (LP)

Este método é usado para identificar trincas superficiais em materiais não poroso. Um líquido colorido ou fluorescente é aplicado na superfície da peça, penetrando nas descontinuidades. Após a remoção do excesso e aplicação do revelador, as indicações se tornam visíveis como mostra a Figura 7.

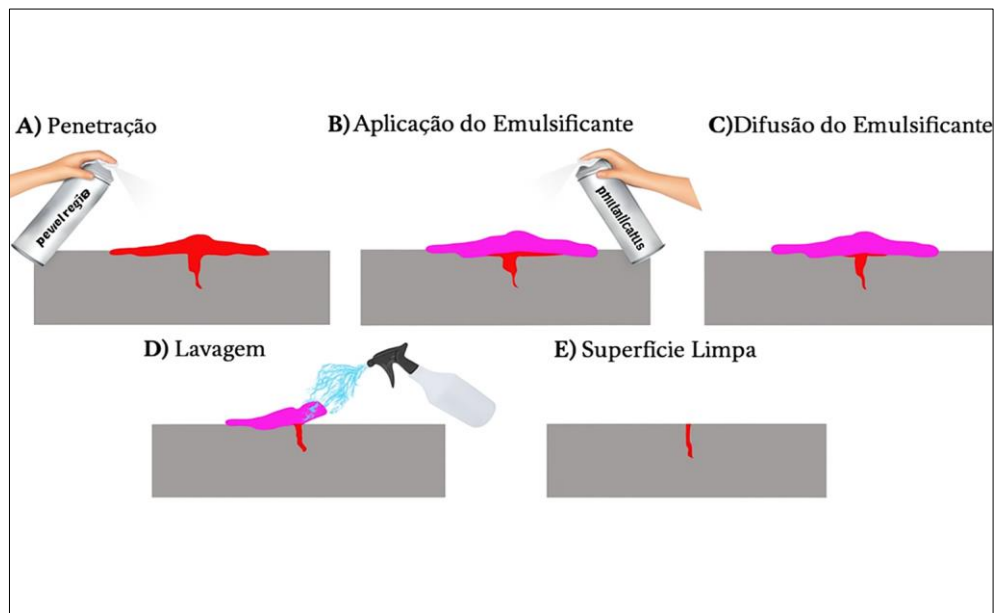
Aplicação:

- Verificação de fuselagens, asas e outras partes críticas identificando trincas superficiais.
- Detecção de fissuras em pás de turbinas e componentes de motores.
- Avaliação de qualidade de soldas em estruturas aeronáuticas.

Vantagens: aplicável em vários materiais como liga de alumínio e titânio, alta sensibilidade na detecção de descontinuidade superficiais, simples e de baixo custo.

Desvantagens: detecta somente defeitos que estejam abertos na superfície, não é adequado para materiais porosos onde o penetrante pode infiltrar-se no material causando falsos positivos e necessário uma limpeza da superfície antes da aplicação para evitar resultados imprecisos.

Figura 7 Etapas de aplicação de líquido penetrante.

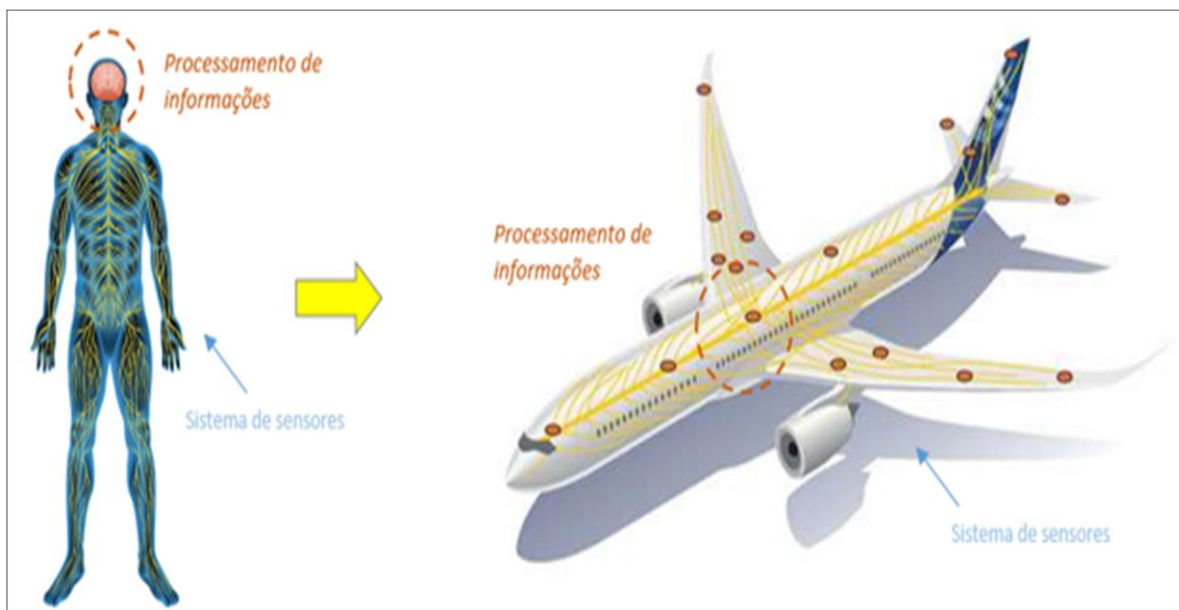


Fonte: Ingenieriapedia (2025).

2.3.7. Sensores para monitoramento de saúde estrutural (SHM)

É uma tecnologia nova que se utiliza de sensores fixados na aeronave a fim de identificar fadiga e desgaste na estrutura em tempo real. As variações de tensão, vibração e deformação são captadas através de sensores que enviam os dados via softwares desenvolvidos e especializados permitindo a detecção precoce de anomalias. Seu funcionamento é muito semelhante ao sistema nervoso humano conforme a Figura 8, onde os sensores e fios em uma estrutura agem como nervos e receptores do corpo, coletando dados e enviando para uma central de processamento. Assim como o cérebro faz com as informações do corpo os softwares analisa os dados coletados pelos sensores da aeronave.

Figura 8. Visão do SHM comparado à estrutura do sistema nervoso humano



Fonte: Kotengenharia (2025)

O monitoramento estrutural contínuo (SHM) contribui diretamente para a tomada de decisões estratégicas voltadas à preservação da integridade estrutural de equipamentos e sistemas. Ele atua de forma proativa, ao lado de profissionais especializados, permitindo intervenções no momento adequado e evitando ações corretivas tardias. Quando corretamente aplicado, o SHM possibilita a comparação entre as estimativas teóricas de fadiga e o comportamento real da estrutura em operação, eliminando a necessidade de realizar novos cálculos para prever a vida útil remanescente. Assim, os dados obtidos dos sensores instalados fornecem uma estimativa precisa do desgaste estrutural ao longo do tempo.

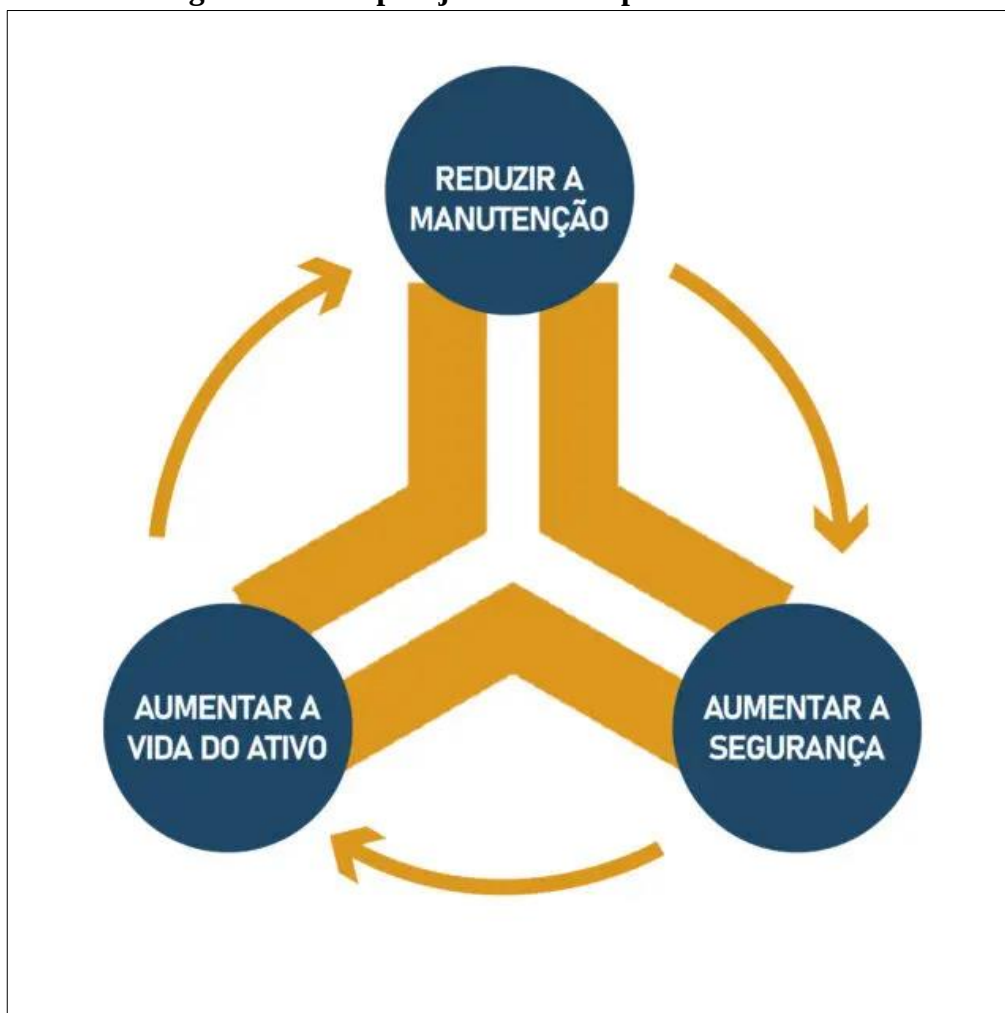
A relação entre o SHM e a segurança operacional é direta e significativa. A identificação precoce de falhas ou alterações anormais no comportamento estrutural reduz significativamente o risco de falhas catastróficas inesperadas, protegendo tanto vidas quanto patrimônios. Além disso, os dados fornecidos pelo sistema auxiliam tanto na gestão técnica quanto no planejamento gerencial, otimizando os processos de manutenção e permitindo ações mais bem fundamentadas. O uso do SHM ainda possibilita uma gestão mais eficiente da manutenção, já que fornece informações detalhadas sobre o consumo da vida útil dos componentes, contribuindo para a redução de custos e aumento da disponibilidade operacional da estrutura monitorada.

O objetivo principal dessa tecnologia é fornecer um diagnóstico contínuo do estado estrutural dos componentes ao longo de toda a vida útil do ativo. Mesmo com estruturas bem projetadas e validadas por processos de certificação rigorosos, fatores como condições de uso,

ambiente e eventos inesperados podem gerar danos que escapam às previsões de projeto. O SHM permite incorporar essa variabilidade real à avaliação estrutural, trazendo uma abordagem de prognóstico embasado em dados contínuos complementando a engenharia tradicional, na Figura 9 as principais justificativas para a utilização do SHM fazem um ciclo continuo onde a sua utilização leva a redução da manutenção, aumento da qualidade e vida útil do ativo.

Embora os primeiros registros do uso de sistemas de monitoramento estrutural remontem à década de 1940, seu uso se intensificou apenas nas últimas décadas. Isso se deve, em parte, à diminuição dos custos de sensores, softwares e sistemas embarcados, e também à maior conscientização técnica e científica sobre a importância de garantir desempenho estrutural com foco em segurança, eficiência de uso e durabilidade.

Figura 9. Principais justificativas para uso do SHM



Fonte: Kotengenharia (2025)

3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo, são descritos os métodos e procedimentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. São apresentados os principais tipos de Ensaio Não Destrutivo empregados na indústria aeronáutica, as regulamentações que norteiam sua aplicação e os requisitos de qualificação profissional. Além disso, são exploradas as tecnologias emergentes de monitoramento estrutural, destacando o avanço rumo à manutenção preditiva e ao monitoramento contínuo da integridade das aeronaves.

3.1. Métodos de Inspeção Não Destrutivos na Indústria Aeronáutica

A aplicação de Ensaio Não Destrutivo (END) é uma etapa fundamental e crítica na manutenção e fabricação aeronáutica. Devido aos rigorosos padrões de segurança e à complexidade dos materiais (como ligas metálicas avançadas e compósitos), os métodos de inspeção devem ser altamente sensíveis e confiáveis para detectar discontinuidades em estágios iniciais, antes que estas comprometam a integridade estrutural da aeronave.

Os ENDs mais utilizados na aviação, regulamentados por órgãos como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Federal Administração de Aviação (FAA), incluem:

3.1.1. Inspeção por Ultrassom (US)

O Ultrassom é um dos pilares da inspeção aeronáutica, sendo particularmente eficaz para a detecção de falhas internas, como trincas, inclusões e descolamentos (delaminações) em materiais compósitos e estruturas coladas.

- **Técnicas Avançadas:** Para componentes críticos e geometrias complexas, as técnicas convencionais foram complementadas pelo Ultrassom Phased Array (PAUT). Esta metodologia emprega transdutores com múltiplos elementos ativos que permitem a varredura eletrônica do feixe sônico, focando-o e angulando-o em tempo real. O PAUT é crucial para a inspeção rápida e precisa de grandes áreas, soldas e juntas de fuselagem, fornecendo uma imagem seccional (B-Scan) e de área (C-Scan) da peça.

3.1.2. Inspeção por Correntes Parasitas (Eddy Current - EC)

O ensaio por Correntes Parasitas é indispensável para a detecção de discontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais condutores, como ligas de alumínio.

- **Aplicações Críticas:** Seu principal uso na aviação está na verificação de furos de fixadores (rebites e parafusos), onde microtrincas de fadiga tendem a se iniciar. O método é

extremamente sensível a essas pequenas falhas. Além disso, variações em amplitude e fase do sinal de correntes parasitas permitem a avaliação da corrosão sob o revestimento (Corrosão sob revestimento - CUC), vital para a longevidade da aeronave.

3.1.3. Inspeção por Partículas Magnéticas (PM) e Líquidos Penetrantes (LP)

Estes são considerados métodos de inspeção de superfície, com alta sensibilidade para descontinuidades abertas.

- Líquidos Penetrantes (LP): Aplicado em componentes não porosos e não condutores de eletricidade (ou em materiais metálicos que não sejam ferromagnéticos), o LP utiliza um líquido que penetra nas descontinuidades, sendo revelado para visualização. É muito comum em inspeções de pás de turbinas e componentes de motores.

- Partículas Magnéticas (PM): Restrito a materiais ferromagnéticos (como aços de alta liga), este método detecta descontinuidades superficiais e levemente subsuperficiais através da aplicação de um campo magnético e partículas finas. É amplamente empregado em componentes de trem de pouso e eixos.

3.1.4. Inspeção por Radiografia Industrial (RI)

A Radiografia é essencial quando se busca uma análise interna da peça sem a necessidade de desmontagem.

RI Digital: A evolução para a Radiografia Digital (CR - Computed Radiography ou DR - Direct Radiography) melhorou drasticamente a aplicabilidade do método, permitindo a obtenção de imagens instantâneas e a manipulação digital para aprimoramento da visualização e arquivamento mais eficiente. É frequentemente usada para inspecionar áreas complexas de motores, estruturas internas e montagens de difícil acesso.

A correta seleção e aplicação destes métodos, aliada à qualificação de pessoal (em conformidade com padrões Nível I, II e III), são a garantia da manutenção da segurança operacional e da conformidade regulatória exigida na indústria aeroespacial.

3.1.5. Regulamentação e Qualificação de Pessoal em END

A segurança intrínseca da aviação exige que todos os processos de manutenção, especialmente os Ensaios Não Destrutivos (END), sejam conduzidos sob estrita regulamentação. Os órgãos de aviação civil em todo o mundo estabelecem as bases para a conformidade:

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) no Brasil, a Federal Aviation Administration (FAA) nos Estados Unidos e a European Union Aviation Safety Agency (EASA) na Europa são exemplos de autoridades que emitem normas e instruções suplementares que detalham os requisitos mínimos para a inspeção e certificação de produtos aeronáuticos. Tais regulamentos determinam, por exemplo, a frequência e o tipo de inspeção a ser realizada em componentes críticos.

A filosofia moderna de manutenção aeronáutica é amplamente orientada pela metodologia Maintenance Steering Group-3 (MSG-3), que foca na manutenção orientada por tarefas e condições. O MSG-3 classifica os danos potenciais e as falhas em categorias, exigindo que as tarefas de inspeção sejam planejadas e implementadas de forma a prevenir falhas estruturais, sendo os ENDS a principal ferramenta para a execução dessas tarefas preventivas (conforme a referência ao MSG-3 em seu material de apoio). Os Manuais de Manutenção e Inspeção das aeronaves, baseados em análises MSG-3, prescrevem o método de END, o procedimento, a área a ser inspecionada e o critério de aceitação/rejeição.

3.1.6. Qualificação e Certificação profissional

A eficácia do END depende diretamente da competência do profissional que o executa e, principalmente, o interpreta. Por isso, a qualificação do pessoal é rigorosamente controlada por normas internacionais, como a NAS 410 ou as diretrizes da American Society for Nondestructive Testing (ASNT), frequentemente adotadas no Brasil pela Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI).

O sistema de qualificação é tipicamente dividido em três níveis, garantindo uma hierarquia de competência:

Nível 1: Executa ensaios sob supervisão e registra os resultados.

Nível 2: Executa e dirige ensaios, interpreta e avalia os resultados conforme normas e especificações.

Nível 3: Responsável por estabelecer procedimentos, qualificar o pessoal de Nível 1 e 2, e aprovar os procedimentos de END (ABENDI/ASNT).

Em síntese, na indústria aeronáutica, o desenvolvimento e a aplicação de qualquer método de inspeção não destrutivo devem estar sempre alinhados com as diretrizes da ANAC/FAA/EASA e só podem ser executados por profissionais devidamente qualificados e certificados, garantindo a rastreabilidade e a confiabilidade de cada avaliação estrutural.

Os treinamentos são realizados no Centros de Treinamento de Aviação Civil - CTAC, conforme o RBAC 142).

A certificação profissional em Ensaios Não Destrutivos (END) (Níveis 1, 2 ou 3) possui, por padrão, uma validade de 5 (cinco) anos, em conformidade com normas como a NAS 410 e diretrizes da ABENDI/ASNT.

Para manter a qualificação, o profissional deve passar pelo processo de recertificação, que pode ocorrer de duas formas:

Recertificação por Exame: Realização e aprovação em um novo exame prático e/ou teórico, sendo a forma mais comum e rigorosa de manutenção do conhecimento.

Recertificação por Acumulação de Evidências (Continuity of Service): Comprovação de serviço contínuo e satisfatório na área, sem interrupções significativas. A aceitação desta modalidade é uma prerrogativa do Nível 3 da empresa ou do órgão certificador.

3.2. Tecnologias em Desenvolvimento

Embora os Ensaios Não Destrutivos (END) tradicionais (Ultrassom, Partículas Magnéticas, etc.) sejam essenciais e eficazes para a detecção de descontinuidades durante as paradas programadas de manutenção, a indústria aeronáutica busca continuamente soluções que permitam uma avaliação da integridade estrutural mais eficiente, preditiva e, idealmente, em tempo real.

O modelo tradicional de manutenção baseada em intervalos fixos está sendo progressivamente substituído por estratégias de Manutenção Preditiva (PdM) e de monitoramento baseado em condição, onde a inspeção deixa de ser uma atividade pontual e passa a ser um processo contínuo.

Neste contexto, o conceito de Monitoramento da integridade estrutural (SHM), ou Monitoramento da Saúde Estrutural, emerge como a tecnologia-chave para a próxima geração de aeronaves. O SHM envolve a integração de redes de sensores inteligentes diretamente na estrutura da aeronave (embutidos ou fixados) para coletar dados contínuos sobre o estado de danos, fadiga, temperatura e deformação. Ao transformar a própria estrutura em um sensor, o SHM objetiva:

- Reduzir o tempo de parada da aeronave (AOG - Aeronaves em terra): Ao indicar exatamente onde e quando a manutenção é necessária.
- Otimizar custos: Migrando de inspeções em áreas extensas para a verificação cirúrgica de pontos críticos.
- Aumentar a segurança: Permitindo o acompanhamento em tempo real de danos potenciais que podem ser causados por eventos não planejados (Ex: impactos).

- Dentre as principais tecnologias que estão impulsionando a inovação pode se destacar os sensores e sistemas SHM de coleta de dados que monitora a saúde da estrutura em seu ambiente operacional, entre eles podem ser destacados os seguintes:

3.2.1 Monitoramento de Vácuo comparativo (CVM):

Baseia-se na medição da diferença de pressão em microcanais dispostos na superfície da estrutura. A formação de trincas cria caminhos para o fluxo de ar, permitindo a detecção da descontinuidade. Ensaios laboratoriais e em aeronaves de teste demonstraram a viabilidade de sua aplicação, especialmente em regiões críticas da fuselagem (RULLI, SILVA, 2010).

Figura 10. Sensores CVM utilizados para monitoramento



Fonte: Rulli; Silva (2012)

3.2.2. Transdutores de onda (LW):

Utiliza a propagação de ondas guiadas para identificar corrosão e redução de espessura em ligas de alumínio. Resultados experimentais mostraram alta precisão na detecção de desbastes artificiais, evidenciando seu potencial na inspeção de estruturas aeronáuticas (DOTTA, SILVA, SILVA, 2011).

Figura 11. Sensores LW utilizados



Fonte: Rulli; Silva (2012)

3.2.3. Impedância eletromecânica (EMI):

Técnica que relaciona a impedância elétrica de sensores piezoelétricos à resposta mecânica da estrutura. Alterações nos sinais obtidos indicam a presença de danos, conforme o painel de alumínio da figura 12. Estudos em parceria com universidades brasileiras apontam para a sua eficácia em protótipos e painéis metálicos (RULLI, SILVA, 2010).

Figura 12. Painel de teste em alumínio



Fonte: Rulli; Silva (2010)

3.2.4. Emissão acústica (AE):

Consiste na detecção de ondas acústicas emitidas durante a formação ou propagação de trincas sob carregamento. Embora ainda em estágio inicial de validação, essa tecnologia apresenta grande potencial para monitoramento em tempo real (RULLI, SILVA, 2010).

Figura 13. Painel da fuselagem com sensores de monitoramento



Fonte: Rulli; Silva (2010)

3.3. Resultados Obtidos em Testes

A Embraer conduziu diferentes etapas de testes para validar essas tecnologias. Em laboratório, os sensores foram aplicados em corpos de prova metálicos, painéis estruturais e em ensaios de fadiga em escala real, obtendo resultados consistentes na identificação de falhas (RULLI, SILVA, 2011; DOTTA, SILVA, SILVA, 2011).

Posteriormente, sistemas CVM e LW foram instalados em uma aeronave Embraer 190 destinada a testes em voo. Os resultados preliminares indicaram que ambas as tecnologias suportaram as condições reais de operação, confirmando sua viabilidade. Entretanto, foram identificados desafios relacionados à durabilidade de cabos, conectores e sensores, além da necessidade de regulamentação e certificação específica para sua aplicação embarcada (RULLI, DOTTA, SILVA, 2012).

3.4. Discussão e Comparação dos Métodos

Os estudos analisados evidenciam que as tecnologias de SHM complementam os métodos tradicionais de END, apresentando vantagens relevantes. O CVM destacou-se por

permitir o monitoramento contínuo de áreas críticas sem a necessidade de desmontagens. Já o uso de Lamb Waves mostrou elevada precisão na detecção de corrosão localizada, um dos principais problemas em ligas metálicas aeronáuticas. As técnicas de EMI e AE ainda se encontram em fase de desenvolvimento, mas apresentam potencial de aplicação futura.

De forma geral, as tecnologias de SHM demonstraram capacidade de reduzir o tempo de inspeção, facilitar o acesso a áreas restritas, detectar danos precocemente e diminuir custos operacionais. Contudo, a implementação definitiva dessas soluções depende de avanços em durabilidade, padronização de procedimentos e certificações internacionais. Assim, os END avançados e os sistemas de SHM representam uma evolução natural nos processos de manutenção aeronáutica, contribuindo para maior segurança e eficiência operacional.

3.5. Exemplos de Aplicação Prática

O quarto capítulo ilustra a aplicação real das tecnologias estudadas, com foco nas iniciativas desenvolvidas pela Embraer. São descritos casos de testes em voo, parcerias com companhias aéreas e estudos experimentais que demonstram a viabilidade e os resultados obtidos com o uso de sistemas de monitoramento estrutural (SHM). Essa seção evidencia como os conceitos teóricos e os métodos de inspeção são empregados em cenários reais da aviação.

3.5.1. Exemplos de Plataformas e Aplicações do SHM na Embraer

A validação e o desenvolvimento da tecnologia de Monitoramento da integridade estrutural (SHM) na Embraer são fundamentados em uma estratégia de testes que abrange desde aeronaves de desenvolvimento até parcerias com companhias aéreas para aplicações em ambientes operacionais. As principais plataformas e contextos de teste incluem:

3.5.2. Aeronaves de Teste de Voo da Família E-Jets

O esforço inicial de pesquisa e desenvolvimento concentrou-se na primeira geração de jatos comerciais da Embraer, a família E-Jets. Os métodos de SHM mais investigados neste contexto são o Monitoramento Comparativo de Vácuo (CVM) e o Lamb Waves (LW).

Embraer 190 (E190): Este modelo serviu como a principal plataforma de teste de voo (aeronave de teste de voo) a partir de 2010. Sensores CVM e LW foram instalados na aeronave com o propósito de avaliar a resistência e o desempenho dessas tecnologias sob as condições operacionais e ambientais reais de voo.

Testes em Artigos de Fadiga: Além dos testes em aeronaves completas, o desempenho das tecnologias de SHM foi validado em artigos de teste de fadiga em escala real (Artigo sobre teste de fadiga em escala real) e artigos de teste de barril (Artigo de teste de barril) da família E-Jets. Esses testes de laboratório permitiram a simulação e a avaliação controlada da detecção de danos estruturais.

3.5.3. Parcerias em Aeronaves em Serviço (Aeronaves em serviço)

Visando a transição do conceito de SHM Programado (Scheduled SHM – S-SHM) para a rotina de manutenção da aviação comercial, a Embraer estabeleceu colaborações estratégicas para a instalação dos sistemas de monitoramento em aeronaves já em operação na Figura 14 está a aeronave ERJ 190 E1 da companhia Aérea Azul.

Parceria com Azul Linhas Aéreas Brasileiras: Em um esforço conjunto, a Embraer uniu-se à Azul, ao Garantia de aeronavegabilidade NDI Validação Center (AANC) nos EUA, e à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) no Brasil. Na figura 10 mostra o modelo de aeronave no qual o projeto envolveu a instalação dos sistemas CVM e Lamb Waves em aeronaves da Azul em serviço. O objetivo central é validar o desempenho dos sistemas SHM em um ambiente operacional real (aeronaves em serviço) e gerar o pacote de dados necessário para o processo formal de qualificação e certificação perante as autoridades aeronáuticas.

Figura 14. E190 E1 Azul



Fonte: Poder aéreo (2025)

3.5.4. Outras Aplicações de Pesquisa

Em um escopo mais amplo de pesquisa e viabilidade, outros modelos de aeronaves foram utilizados para estudos pontuais de técnicas de inspeção, como a aeronave agrícola Embraer EMB-200 (Ipanema) figura 15, demonstrando a versatilidade na aplicação de conceitos de SHM em diferentes tipos de estruturas aeronáuticas.

Figura 15. Ipanema



Fonte: Defesaaeronaval (2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos ao longo da pesquisa, comparando os métodos tradicionais de Ensaios Não Destrutivos com as novas tecnologias de Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM). A discussão evidencia as vantagens, limitações e desafios de cada abordagem, destacando a importância da integração entre os métodos convencionais e os sistemas inteligentes de monitoramento para o aprimoramento da manutenção aeronáutica.

4.1. Análise dos Ensaios e Tecnologias de Monitoramento Estrutural

A análise realizada evidencia que os Ensaios Não Destrutivos (END) permanecem como ferramentas indispensáveis na inspeção estrutural aeronáutica, em razão de sua ampla normatização e reconhecida confiabilidade. Técnicas como ultrassom, correntes parasitas e líquidos penetrantes continuam a apresentar alta precisão na detecção de descontinuidades localizadas, desempenhando papel essencial nos processos de certificação e manutenção da integridade estrutural das aeronaves. No entanto, esses métodos ainda demandam mão de obra altamente qualificada, envolvem operações de desmontagem frequentes e estão sujeitos à variabilidade decorrente de fatores humanos, o que pode impactar a eficiência das inspeções.

Em contrapartida, os sistemas de monitoramento estrutural (SHM – Monitoramento da integridade estrutural) representam um avanço significativo, possibilitando o acompanhamento contínuo da integridade estrutural e reduzindo a dependência de inspeções presenciais. Pesquisas conduzidas por Dotta et al. (2011) demonstraram que sensores baseados em Lamb Waves foram capazes de identificar reduções de espessura em torno de 2% em ligas de alumínio aeronáuticas, comprovando a sensibilidade da técnica para detecção precoce de processos corrosivos, um dos principais mecanismos de degradação em estruturas metálicas aeronáuticas.

De forma complementar, nos ensaios em voo realizados pela Embraer (Rulli; Dotta; Anchieta, 2012), sensores de CVM (Monitoramento Comparativo de Vácuo) e Lamb Waves foram instalados em uma aeronave Embraer 190, com resultados positivos quanto à resistência às condições reais de operação. O sistema CVM demonstrou ainda a capacidade de detectar trincas de até 2 mm, posteriormente confirmadas por inspeções END convencionais, reforçando o potencial de integração desses sensores a sistemas embarcados para monitoramento contínuo e automatizado.

Os resultados apontam que a aplicação do SHM proporciona benefícios expressivos, tais como:

Redução do tempo e dos custos de manutenção, minimizando desmontagens e inspeções manuais recorrentes;

Aumento da disponibilidade operacional da aeronave, uma vez que as intervenções são otimizadas;

Diminuição da influência de falhas humanas, pois a coleta e o processamento de dados ocorrem de forma automatizada;

Implementação da manutenção baseada em condição (CBM), substituindo modelos, a tabela 1 apresenta a comparação dos benefícios e características das tecnologias SHM.

Tabela 1: Benefícios X características das tecnologias SHM (CVM x LW)

Aspecto / Critério	CVM (Monitoramento a vácuo comparativo)	LW (Ondas de Lamb)
Princípio de funcionamento	Baseado na variação de vácuo em micro canais adesivos sensíveis a vazamentos causados por trincas.	Baseado na propagação de ondas ultrassônicas (modos simétrico e antissimétrico) sensíveis a mudanças estruturais.
Tipo de dano detectado	Trincas superficiais e próximas a rebites em estruturas metálicas.	Trincas, corrosão e delaminações em materiais metálicos e compósitos.
Complexidade do sistema	Simples, leve e de fácil instalação.	Mais complexo, requer hardware de aquisição de dados (DAQ) e processamento de sinais.
Tipo de sensor	Sensor polimérico autoadesivo e passivo.	Sensores piezoelétricos ativos.
Necessidade de energia	Não requer energia contínua (somente durante a leitura).	Requer alimentação elétrica para excitação e leitura de sinais.
Capacidade de monitoramento contínuo (A-SHM)	Sim – em desenvolvimento, com sistema embarcado de leitura em voo.	Ainda em fase experimental, com monitoramento periódico em solo.
Deteção precoce de danos	Alta sensibilidade – detectou trincas de 2 a 3 mm nos testes em barril metálico.	Alta sensibilidade – detecta variações microestruturais e delaminações.
Aplicabilidade em materiais compósitos	Limitada a estruturas metálicas.	Aplicável tanto a metais quanto a compósitos (CFRP).
Integração e manutenção	Fácil instalação, leve e pouco invasivo.	Requer instalação precisa e calibração de sensores.
Resistência a ambiente operacional	Demonstrou boa resistência nas condições de voo e laboratório.	Também resistiu bem às condições operacionais em voo e solo.
Benefícios principais	- Simplicidade e baixo custo	- Deteção ampla (inclusive em compósitos)
	- Redução de tempo de inspeção	- Alta sensibilidade e precisão
	- Baixa influência de fatores humanos	- Potencial para diagnóstico avançado
Situação nos testes da Embraer	Instalado em E-Jet (Embraer 190) com sucesso; versão embarcada em desenvolvimento.	Testado em E-Jet (Embraer 190) com sensores instalados; leituras feitas em solo.
Papel no conceito CBM (Manutenção baseada em condições)	Forte potencial de aplicação direta, devido à simplicidade e viabilidade de uso em voo.	Alta capacidade técnica, porém ainda mais adequada a uso experimental e integração futura.

Fonte: autores (2025)

Embora a utilização do SHM teria apresentado diversos pontos positivos ainda existe limitações e desafios pela frente como apresentado na Tabela 2:

- A necessidade de padronização normativa para certificação das tecnologias (ex.: RTCA/DO-160E e DO-178B).
- Questões de confiabilidade a longo prazo, como a durabilidade de sensores e cablagens em ambientes aeronáuticos hostis.
- O custo inicial de implementação dos sistemas SHM, que ainda é elevado quando comparado às inspeções tradicionais.
- A necessidade de integração com sistemas de bordo, garantindo compatibilidade eletromagnética e segurança operacional.

Dessa forma, os resultados indicam que o SHM não substitui totalmente os END tradicionais no cenário atual, mas sim se apresenta como um sistema complementar altamente promissor. Enquanto os END oferecem precisão e confiabilidade consolidada, o SHM agrega valor ao permitir o monitoramento contínuo, reduzindo custos operacionais e melhorando a segurança.

A adoção futura dos sistemas SHM dependerá diretamente da evolução normativa, da validação em longo prazo e da comprovação de sua eficácia em serviço. A tendência observada é que a integração gradual dessas tecnologias possibilite um novo paradigma de manutenção aeronáutica, mais ágil, segura e econômica.

Tabela 2: Limitações e desafios das tecnologias SHM (CVM x LW)

Aspecto / Desafio	CVM (Monitoramento comparativo a vácuo)	LW (Ondas de Lamb)
Tipo de limitação principal	Limitação física (aderência, cabos e vácuo estável).	Limitação computacional e de processamento de sinais.
Complexidade de integração	Baixa, mas depende de boa instalação dos sensores e conexões de vácuo.	Alta, devido à necessidade de hardware de aquisição de dados (DAQ) e calibração precisa.
Calibração e interpretação dos resultados	Simples, mas sensível à qualidade da vedação e ao nível de vácuo.	Complexa, exige algoritmos sofisticados e tratamento de sinais para distinguir ruído de dano real.
Requisitos de qualificação e certificação	Necessita comprovar resistência a ambiente de voo (DO-160E) e confiabilidade do vácuo.	Envolve requisitos adicionais de software (DO-178B), interferência eletromagnética (EMI) e integração com sistemas de bordo.
Sensibilidade a fatores ambientais	Pode sofrer influência de temperatura e umidade na aderência do sensor.	Pode ser afetada por ruído estrutural, temperatura e variações de acoplamento das ondas.
Aplicação em materiais compósitos	Limitada a superfícies metálicas — baixa aderência em CFRP.	Requer ajustes complexos de parâmetros devido à anisotropia dos compósitos.
Durabilidade dos sensores e cabos	Boa resistência demonstrada, mas requer testes de longo prazo.	Durabilidade ainda em avaliação — risco de degradação de sensores piezoelétricos com o tempo.
Instalação e manutenção	Instalação simples, mas pode demandar grande número de sensores para cobrir áreas extensas.	Instalação trabalhosa e demanda alto controle geométrico do acoplamento dos sensores.
Custo e infraestrutura de suporte	Custo inicial menor, porém, depende de sistema de vácuo e manutenção dos sensores.	Maior custo de equipamento e software de análise.
Capacidade de monitoramento contínuo (A-SHM)	Em desenvolvimento — versão embarcada ainda em fase de testes.	Ainda em estudos — atualmente utilizada apenas em modo periódico (em solo).
Interpretação automatizada dos dados	Limitada — depende de leitura manual ou periódica via equipamento de solo.	Requer alto processamento de dados e algoritmos de diagnóstico complexos.
Desafios gerais identificados pela Embraer	- Manter estabilidade do vácuo e vedação	- Processar grandes volumes de dados
	- Garantir confiabilidade do sensor em longo prazo	- Garantir estabilidade dos sinais de onda em ambiente real
	- Validar desempenho em voo contínuo	- Desenvolver método os robustos de detecção automática de falhas

Fonte: autores (2025)

5. CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Graduação alcançou seu objetivo principal ao analisar as principais técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END) e sua aplicação na garantia da qualidade e integridade de estruturas aeronáuticas.

Ao longo da pesquisa, foram cumpridos os objetivos específicos, detalhando-se os princípios de funcionamento, as vantagens e as limitações de métodos tradicionais, como Ultrassom (US), Correntes Parasitas (EC), Líquido Penetrante (LP), Partículas Magnéticas (PM) e Radiografia Industrial (RI). Constatou-se que estes métodos são cruciais e insubstituíveis para a detecção de descontinuidades superficiais e internas em ligas metálicas e compósitos utilizados na aviação.

O estudo reforçou a vital importância da conformidade com as rigorosas regulamentações de órgãos como ANAC, FAA e EASA, bem como a necessidade de qualificação e certificação de pessoal técnico nos Níveis 1, 2 e 3, para garantir a confiabilidade e a rastreabilidade de cada inspeção estrutural.

O principal achado deste trabalho reside na demonstração de que a inovação tecnológica está orientando o setor aeronáutico para uma mudança de paradigma, migrando da manutenção baseada em intervalos fixos para uma abordagem preditiva e baseada em condição. Neste contexto, o Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM), com a integração de redes de sensores inteligentes (como CVM e Transdutores de Onda - LW) diretamente na estrutura da aeronave, é a tecnologia-chave em desenvolvimento.

Os resultados da análise indicam que as tecnologias de SHM atuam como um complemento essencial aos métodos de inspeção convencionais, pois permitem o diagnóstico contínuo da saúde estrutural, o que se traduz diretamente em:

- Redução do tempo de aeronave em solo (AOG);
- Otimização de custos operacionais;
- Aumento significativo da segurança operacional, por permitir a identificação precoce de falhas.

A validação em testes de voo, como os realizados pela Embraer com sistemas CVM e LW, confirma a viabilidade e o potencial desses sistemas embarcados para a gestão mais eficiente da vida útil dos ativos.

Em conclusão, o futuro da manutenção aeronáutica está intrinsecamente ligado à evolução e à plena integração dos Ensaios Não Destrutivos tradicionais com os sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR NM 3335:2003 – Ensaio não destrutivo – Terminologia. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/227944/abnt-nm3335-ensaio-nao-destrutivo-ultrassons-terminologia>. Acesso em: 27 maio 2025.

AERO COMPONENTS. Métodos de ensaios não destrutivos. [S.l.]: Aero Components, 2025. Disponível em: <https://www.aerocomponentsbr.com/site/vi/ndt/methods/>. Acesso em: 22 set. 2025.

AERONAVE 2014. Inspeção por correntes parasitas [Blog]. 2025. Disponível em: [INFORMAÇÃO FALTANTE: URL COMPLETA do blogspot]. Acesso em: 14 out. 2025.

AERONAVE Ipanema 203 em voo. 2023. [Fotografia]. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/aviacao/aeronave-agricola-ipanema-203-da-embraer-mantem-forte-ritmo-de-vendas>. Acesso em: 04 nov. 2025.

AEROSPACE NDT SERVICES SÀRL. Métodos. [Geneva]: Aerospace NDT Services Sàrl, 2025. Disponível em: <https://www.aerospacendtservices.com/site/en/methods/>. Acesso em: 14 out. 2025.

ANAMAVE. Ensaios não destrutivos na infraestrutura. 2014. Disponível em: <https://anamave2014.blogspot.com/>. Acesso em: 22 set. 2025.

ASNT (American Society for Nondestructive Testing). **Recommended Practice No. SNT-TC-1A: Personnel Qualification and Certification in Nondestructive Testing.** Columbus: ASNT, 2015.

ASTM. **Nondestructive Testing Handbook.** v. 1 a 11. ASTM Press, 2015.

CHELL, G. G. **Visual Inspection: A Guide for NDT Personnel.** ASNT Press, 2016.

DIGITAL SEST SENAT. Introdução aos ensaios não destrutivos. [S.l.]: Sest Senat, [s.d.]. Disponível em: <https://digital.sestsenat.org.br/cursos/introducao-aos-ensaios-nao-destrutivos>. Acesso em: 22 set. 2025.

DOTTA, Fernando; SILVA, Fabio Santos da; SILVA, Andres Barroso da. Early results of Lamb Waves approach to assess corrosion damage using direct image path in an aeronautical aluminum alloy. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING (IWSHM)**, 2011.

ENGEPERÍCIA. Passos de inspeção visual e líquida penetrante. [S.l.]: Engeperícia, [s.d.]. Disponível em: <https://engepericia.com/passos-de-inspecao-visual-e-ensaio-liquido-penetrante/>. Acesso em: 22 set. 2025.

ENSAIO.ORG. Ensaios não destrutivos – conceitos básicos. [S.l.]: Ensaio.org, [s.d.]. Disponível em: <https://ensaio-ndt.org/ensaios-ndt-basicos/>. Acesso em: 22 set. 2025.

HELLIER, C. Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw-Hill Education, 2013.

INGENIERIAPEDIA. Ultrassom Phased Array: o que é e como funciona. [S.l.]: Ingenieriapedia, 2025. Disponível em: [INFORMAÇÃO FALTANTE: URL COMPLETA da postagem da Ingenieriapedia]. Acesso em: 14 out. 2025.

INSPESOLDA. Ensaio de Ultrassom (US). [S.l.]: Inspesolda, 2025. Disponível em: <https://www.inspesolda.com.br/ensaios-ultrassom>. Acesso em: 14 out. 2025.

KOT ENGENHARIA. Como funciona o SHM (Structural Health Monitoring). [S.l.: s.n., s.d.]. Disponível em: <https://kotengenharia.com.br/como-funciona-o-shm-structural-health-monitoring/>. Acesso em: 14 out. 2025.

KRAUTKRÄMER, Josef; KRAUTKRÄMER, Herbert. Ultrasonic Testing of Materials. Springer, 1990.

MILLER, R. K.; HILL, E. V. K.; MOORE, P. O. Nondestructive Testing Handbook: Acoustic Emission Testing (Vol. 6). American Society for Nondestructive Testing (ASNT), 2005.

MOURA, L. M. Análise Comparativa de Técnicas de Ensaios Não Destrutivos em Estruturas Metálicas. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2021.

PODER AÉREO. Embraer 195 E2 no Aeroporto Santos Dumont. 2023. [Fotografia]. Disponível em: <https://www.aereo.jor.br/2023/04/27/azul-aeronaves-embraer-195-e1-e-e2-certificadas-para-procedimentos-rnp-ar-no-aeroporto-santos-dumont/>. Acesso em: 04 nov. 2025.

RAMOS, David Henrique. Avaliação de ensaios não destrutivos aplicados ao concreto armado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019.

RULLI, Ricardo Pinheiro; DOTTA, Fernando; SILVA, Paulo Anchieta da. Flight tests performed by Embraer with SHM systems. In: **ASIA-PACIFIC WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING (APWSHM)**, 2012.

RULLI, Ricardo Pinheiro; SILVA, Paulo Anchieta da. Embraer perspective for maintenance plan improvements by using SHM. In: **ASIA-PACIFIC WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING (APWSHM)**, 2010.

RULLI, Ricardo Pinheiro; **SILVA**, Paulo Anchieta da. Overview of CVM technology tests performed by Embraer. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING (IWSHM)**, 2011.

SEST SENAT. Introdução à Inspeção de Aeronaves. [S.l.]: SEST SENAT, 2025. Disponível em: <https://digital.sestsenat.org.br/cursos/introducao-a-inspecao-de-aeronaves>. Acesso em: 14 out. 2025.

SILVA, F. R. da. **Aplicações dos Ensaios Não Destrutivos na Indústria de Processos**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, Jedaías Januário da. **Estudo e aplicações dos ensaios não destrutivos no meio industrial**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2021.

SKYBRARY. Maintenance Steering Group-3 (MSG-3). [S.l.]: Skybrary, [s.d.]. Disponível em: <https://skybrary.aero...> Acesso em: 14 out. 2025.

UFSC. Ensaios não destrutivos em materiais. [S.l.]: UFSC, [s.d.]. Disponível em: <https://ndt.ufsc.br/ensaios-na-infraestrutura/>. Acesso em: 22 set. 2025.