UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

JUAN LUIZ CONSENTINE CAMPOS

Contaminação de combustível em aeronaves: causas, efeitos e estratégias de prevenção baseadas em estudos de caso

São João da Boa Vista
2025

JUAN LUIZ CONSENTINE CAMPOS

Contaminação de combustível em aeronaves: causas, efeitos e estratégias de prevenção baseadas em estudos de caso

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em ENGENHARIA AERONÁUTICA do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estatual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em ENGENHARIA AERONÁUTICA .

Orientador: Profº Dr. ÉDER LUIZ OLIVEIRA
Coorientador: MOISÉS RABELO SANTANA

São João da Boa Vista
2025

C198c

Campos, Juan Luiz Consentine

Contaminação de Combustível em Aeronaves : Causas, Efeitos e Estratégias de Prevenção Baseadas em Estudos de Caso / Juan Luiz Consentine Campos. -- São João da Boa Vista, 2025

61 p. : fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Éder Luiz Oliveira

Coorientador: Moisés Rabelo Santana

1. Engenharia. 2. Aeronáutica. 3. Aeronaves. 4. Aviões Combustível. 5. Contaminação biológica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CONTAMINAÇÃO DE COMBUSTÍVEL EM AERONAVES: CAUSAS, EFEITOS E ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO BASEADAS EM ESTUDOS DE CASO

Aluno: Juan Luiz Consentine Campos
Orientador: Prof. Dr. Éder Luiz Oliveira

Banca Examinadora:

- Éder Luiz Oliveira (Orientador)
- Edemar Morsch Filho (Examinador)
- Leandra Isabel de Abreu (Examinadora)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 05 de dezembro de 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, William e Milene, pelo seu apoio e amor que me fizeram o homem que sou. Aos meus irmãos, Pedro, Miguel e Manuela, que tantas vezes me apoiaram, muitas vezes sem sequer saberem disso. À minha companheira, Bruna, cujo carinho e incentivo foram cruciais para que eu trilhasse este longo caminho. Aos meus avós, Juan, Neuza e Silvana, por me acolherem tão bem, sempre de braços abertos e de coração alegre. Aos tantos familiares e amigos que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por toda a força, saúde, sabedoria, paz e amor que depositou em mim para que eu concluísse este ciclo da minha vida. Ao mesmo tempo, à minha mãe celestial, Nossa Senhora de Fátima, cujo manto tantas vezes me acolheu e reergueu.

Aos meus pais, pelo incentivo a buscar meus sonhos e instrução para que eu caminhasse pelos melhores caminhos. Entre tantos momentos vividos apenas ao longo de uma graduação, ressalto a importância do amor que sempre me deram. Incluo neste agradecimento meus irmãos, que tanto preenchem meu coração de alegria.

Aos meus avós, que me acolheram (literalmente) por tanto tempo, física e emocionalmente. Foram anos sentindo seu carinho de perto, comendo "comida de vó"e curtindo cada momento da presença de vocês. Espero ter proporcionado alegrias tanto quanto vocês fizeram por mim.

À minha companheira de vida, Bruna, que é quem escolhi para estar ao meu lado e a quem sou grato por ter igualmente me escolhido. Saiba que seu amor e seu apoio são uma riqueza imensa para mim. Devo muito à sua paciência, que sempre teve comigo, e a sua confiança e incentivo, que me inspiraram a chegar até aqui.

Aos professores que deixaram seus nomes em minha jornada. Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Éder, pelo apoio e incentivo não só neste trabalho, mas também em tantas outras atividades dentro e fora de aula. Um docente aplicado faz muito mais pelos alunos do que apenas ministrar aulas. Estendo este agradecimento ao professor Moisés Rabelo, do Batalhão de Aviação do Exército de Taubaté, por se interessar e por apoiar este trabalho, compartilhando tanto conhecimento quanto experiência de vida.

Finalmente, a todos os amigos, familiares e conhecidos que fizeram parte desta história. Cada um deixou sua marca na minha trajetória, contribuindo para meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional. É gratificante estar rodeado de boas pessoas.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:
BtlMntSupAvEx - Batalhão de Manutenção e Suprimento de Aviação do Exército

“O que faço é uma gota no meio do oceano. Mas, sem ela, o oceano seria menor.“

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

A segurança operacional na aviação depende diretamente da qualidade do combustível utilizado, uma vez que qualquer alteração em suas propriedades físico-químicas pode comprometer o desempenho dos motores e colocar em risco a aeronave, a tripulação, os passageiros, a missão e a operação como um todo. Este trabalho apresenta uma revisão dos principais tipos de contaminação de combustíveis aeronáuticos, como água, partículas sólidas, **microrganismos** e surfactantes. Além disso, também foram abordados os mecanismos associados ao surgimento dessas contaminações foram abordados os mecanismos associados ao surgimento dessas contaminações e os e aos efeitos potenciais delas no sistema de alimentação das aeronaves e em toda a cadeia de abastecimento. São apresentados também os principais métodos de detecção utilizados em ambiente operacional, incluindo testes físico-químicos, análises visuais e procedimentos específicos, como Millipore, Shell Water Detector e Microb Monitor Test Kit, entre tantos outros. Para contextualização prática do estudo e demonstração da aplicação concreta da teoria, foram analisados três estudos de caso: o acidente do Boeing 777 da British Airways em 2008, envolvendo formação de gelo no sistema de combustível devido a contaminação por água; a pesquisa conduzida por Michelle E. Rauch sobre contaminação microbiana em tanques de combustível da Força Aérea dos Estados Unidos; e o caso de contaminação microbiana e por água de um jato Gulfstream. Os resultados demonstram que a contaminação pode ocorrer mesmo quando o combustível atende às especificações normativas, sendo inerente ao meio, às condições de manuseio e armazenamento e a outros fatores coligados, reforçando a necessidade de rotinas de prevenção, inspeções periódicas e procedimentos padronizados ao longo de toda a cadeia logística e operacional. A partir dessas análises, o trabalho consolida recomendações e boas práticas voltadas à prevenção, ao monitoramento e à mitigação de riscos associados à contaminação do combustível aeronáutico.

Palavras-chave: combustível aeronáutico; contaminação; testes de contaminação; segurança operacional; manutenção aeronáutica.

ABSTRACT

Operational safety in aviation depends directly on the quality of the fuel used, since any alteration in its physicochemical properties may compromise engine performance and place at risk the aircraft, crew, passengers, mission, and the entire operation. This paper presents a review of the main types of contamination found in aviation fuels, such as contamination formed by water, solid particles, microorganisms, and surfactants. In addition, the mechanisms associated with the appearance of these contaminations and their potential effects on the aircraft fuel system and throughout the supply chain were also addressed. The main detection methods used in operational environments are also presented, including physicochemical tests, visual analyses, or specific procedures such as Millipore, Shell Water Detector, and Microb Monitor Test Kit, and so on. To provide practical context and demonstrate real application of theory, three case studies were analyzed: the 2008 British Airways Boeing 777 accident, involving ice formation in the fuel system due to water contamination; and the research conducted by Michelle E. Rauch on microbial contamination in aviation fuel tanks of the United States Air Force; and the Gulfstream jet case in wich were detected both microbial and water contaminations. The results demonstrate that contamination may occur even when the fuel meets regulatory specifications, as it is inherent to the environment, handling and storage conditions, and other associated factors, reinforcing the need for prevention routines, periodic inspections, and established procedures throughout the entire logistical and operational chain. Based on these analyses, this work consolidates recommendations and best practices aimed at preventing, monitoring, and mitigating risks associated with aviation fuel contamination.

Keywords: aviation fuel; contamination; contamination testing; operational safety; aircraft maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Contaminação por água de diferentes origens 19
Figura 2 Pasta d'Água 22
Figura 3 Pasta aplicada na régua, em contato com água 22
Figura 4 Resultado do teste com Pasta d'Água 23
Figura 5 Tubo com sais reagentes 24
Figura 6 Teste Exxon Hydrokit 24
Figura 7 posicionamento de agulha e tubo para teste 25
Figura 8 Coloração branca: combustível não contaminado 26
Figura 9 Coloração rosada: combustível contaminado 26
Figura 10 Shell Water Detector 27
Figura 11 CASRI Water Detector 28
Figura 12 Comparação de cápsulas teste 29
Figura 13 Diferença entre os monitores de teste Millipore 30
Figura 14 Recipiente ideal para teste límpido e transparente 31
Figura 15 Vórtice observado durante o teste 32
Figura 16 Material para teste Densidade e Temperatura 33
Figura 17 Teste em andamento 33
Figura 18 Frascos do Microb Monitor Test Kit 35
Figura 19 Boeing 777-236 da British Airways acidentado 36
Figura 20 Esquema do circuito de alimentação de combustível dos motores do 777-200 . . 37
Figura 21 Esquema do circuito do combustível com *FOHE* 38
Figura 22 Grade "colmeia"na entrada da *FOHE* 38
Figura 23 Acúmulo de gelo visível na *FOHE* 39
Figura 24 Jato executivo Gulfstream G280 42
Figura 25 Coleta de amostra de combustível 42
Figura 26 Teste FUELSTAT resinae Plus 43
Figura 27 Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Coleta de amostra 44
Figura 28 Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Passo a Passo 45
Figura 29 Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Leitura de resultados 46
Figura 30 Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Informações adicionais 47
Figura 31 Teste iniciado 48
Figura 32 Teste iniciado 49
Figura 33 Contaminação microbiológica severa em tanque de aeronave 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAIB	Air Accidents Investigation Branch
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Advisory Circular (Circular de Asseromaneto)
AD	Airworthiness Directive (Diretriz de Aeronavegabilidade)
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVGAS	Aviation Gasoline (Gasolina de Aviação)
BAvEx	Batalhão de Aviação do Exército de Taubaté - SP
EB	Exército Brasileiro
FAA	Federal Aviation Administration
FAB	Força Aérea Brasileira
FOHE	Fuel/Oil Heat Exchanger (Trocador de Calor Combustível/Óleo)
IPU	Industrial Power Unit
JET-A1	Querosene de Aviação (equivalente internacional do QAV-1)
JP-5	Querosene de aviação militar
PPM	Partes por milhão
QAV-1	Querosene de Aviação 1
QAV-5	Querosene de Aviação 5
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SB	Service Bulletin (Boletim de Serviço)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TIF	Tensão Interfacial
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USAF	United States Air Force (Força Aérea dos Estados Unidos)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
1.1 O problema da contaminação de combustível 11
1.2 Os desafios enfrentados 11
1.3 Caso 1: Acidente do Boeing 777, British Airways, de 17 de janeiro de 2008 - Contaminação por água 12
1.4 Caso 2: Aeronaves da Força Aérea dos Estados Unidos - Contaminação microbiológica 13
1.5 Caso 3: Contaminação severa dos tanques de combustível de um jato executivo Gulfstream 13
1.6 Relevância do estudo 14

2 ESTRUTURA DO TRABALHO 15

3 OBJETIVOS 16

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
4.1 Combustíveis Aeronáuticos 17
4.1.1 Ponto de Fulgor 17
4.2 Tipos de Combustíveis Aeronáuticos 17
4.2.1 Querosene de Aviação: QAV-1 17
4.2.2 Querosene de Aviação: QAV-5 18
4.2.3 Gasolina de Aviação: AVGAS 18
4.3 Tipos de Contaminação de Combustível 18
4.3.1 Contaminação por Água 18
4.3.2 Contaminação por partículas sólidas 20
4.3.3 Contaminação microbiana 20
4.3.4 Contaminação por Surfactantes 21
4.4 Testes para detecção de contaminação de combustível 21
4.4.1 Pasta Detectora de Água 21
4.4.2 Exxon Hydrokit 23
4.4.3 Shell Water Detector 27
4.4.4 Millipore 29
4.4.5 Límpido e Transparente 30
4.4.6 Densidade e temperatura 32
4.4.7 Microb Monitor Test Kit 34

5 ESTUDOS DE CASO 36
5.1 Contaminação por água: Acidente com Boeing 777-236, British Airways, em 17 de janeiro de 2008 36

5.2 Contaminação biológica: Caracterização de contaminação microbiana em tanques de combustível aeronáutico na Força Aérea dos Estados Unidos 39
5.3 Contaminação nos tanques de combustível de um jato executivo Gulfstream . . . 41

6 PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA 51
6.1 Identificação 51
6.2 Tempo de Armazenamento 52
6.3 Inspeções Periódicas 52
6.4 Drenagem Frequente 52
6.5 Lavagem Periódica dos Tanques 52
6.6 Testes e Ensaios 53
6.7 Registro e Documentação 53

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 54

8 SUGESTÕES DE NOVOS ESTUDOS 56

REFERÊNCIAS 58

1 INTRODUÇÃO

O combustível aeronáutico é um dos elementos mais importantes para o funcionamento seguro e eficiente das aeronaves. Sua qualidade está diretamente ligada ao desempenho dos motores e à confiabilidade das operações. Alterações nas suas propriedades podem comprometer a segurança do voo; por isso, é indispensável o controle rigoroso de todas as etapas da sua cadeia de fornecimento, desde a saída da refinaria até a combustão no motor de uma aeronave.

A contaminação do combustível em aeronaves, portanto, torna-se um dos fatores de risco mais relevantes na manutenção aeronáutica, pois pode comprometer o funcionamento dos sistemas de alimentação e acarretar consequências severas, incluindo a perda parcial de potência em voo ou até mesmo a perda total do motor. Além disso, essa contaminação pode ocorrer em diversas etapas ao longo do ciclo de abastecimento, exigindo atenção e controle de qualidade em todas elas: transporte, armazenamento, abastecimento, manutenção dos tanques, pernoite etc.

1.1 O PROBLEMA DA CONTAMINAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Mesmo em pequenas quantidades, a presença de água, partículas sólidas, microrganismos ou substâncias químicas indevidas pode causar falhas graves no sistema de alimentação da aeronave. Esses contaminantes podem se originar de diferentes formas, como infiltração de umidade, resíduos do processo de abastecimento, má vedação de tanques ou falta de limpeza adequada nos sistemas de armazenamento deste combustível (Rabelo, 2025).

No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece as especificações técnicas e os parâmetros de qualidade para os combustíveis aeronáuticos, incluindo o Querosene de Aviação (QAV-1) e a Gasolina de Aviação (AVGAS) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021a). Em paralelo, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) mantêm diretrizes voltadas à manutenção preventiva e à segurança operacional (Agência Nacional de Aviação Civil, 2021). Já nos Estados Unidos, há algumas agências reguladoras responsáveis pelo tema, como a Federal Aviation Administration (FAA) e a Environmental Protection Agency (EPA) (United States of America, 2025).

1.2 OS DESAFIOS ENFRENTADOS

Mesmo com tantos procedimentos cuidadosos, há registros e investigações de diversas ocorrências com aeronaves ao redor do mundo e até falhas de componentes do sistema, inclusive motores, evidenciando como falhas de armazenamento, drenagem inadequada, manutenção incompleta e manipulação incorreta de combustíveis continuam entre as causas mais recorrentes de panes em voo e incidentes de manutenção, frutos de contaminações de combustível (Brasil, 2025a).

O estudo da contaminação de combustível aeronáutico adquire importância adicional quando se consideram os ambientes operacionais adversos, como os observados em unidades militares espalhadas ao redor do mundo, nos mais diversos cenários, em suas operações. Especialmente, a aviação do

Exército Brasileiro, que contempla em suas missões, por todo território brasileiro, uma ampla gama de biomas e ambientes diversos: clima equatorial e tropical, extremamente quente e úmido; clima semiárido e árido, igualmente quente, mas com baixíssima umidade; clima tropical de altitude, com relevos e picos desafiadores; clima sub-tropical, com frio mais intenso, geadas e até neve (Brasil, 2025b).

A exposição das aeronaves a umidade, variações térmicas e limitações de infraestrutura aumenta a exposição do combustível a intempéries e, consequentemente, à possibilidade de contaminação. Durante visita técnica ao Batalhão de Aviação do Exército (BAvEx), em Taubaté - SP, foi possível observar procedimentos de manutenção e inspeção, como testes de contaminação de combustível, aplicados às aeronaves de asa rotativa que compõem sua frota, demonstrando o rigor necessário nos cuidados empregados para garantir a maior qualidade possível do combustível e a segurança das operações, mesmo em situações tão adversas.

A Força Aérea dos Estados Unidos publicou um artigo apontando os malefícios que a contaminação microbiológica pode gerar em toda a cadeia de armazenamento e distribuição de combustíveis aeronáuticos, inclusive em aeronaves abastecidas com este tipo de combustível: toda a linha de abastecimento e todos os componentes dela estão suscetíveis a falhas em componentes internos das máquinas, falhas do funcionamento total do sistema, corrosão e vazamentos. Segundo o texto, os times de análise e pesquisa da USAF apontam que "apesar de ser impossível se livrar completamente da contaminação por microrganismos, todo cuidado deve ser tomado para minimizar esta ocorrência", diz Holly Jordan, Diretor do Laboratório de Pesquisa de Materiais e Manufatura da USAF (United States of America, 2024).

1.3 CASO 1: ACIDENTE DO BOEING 777, BRITISH AIRWAYS, DE 17 DE JANEIRO DE 2008 - CONTAMINAÇÃO POR ÁGUA

O acidente do Boeing 777-236ER da British Airways, ocorrido em 17 de janeiro de 2008 no Aeroporto de Londres Heathrow, é um sólido exemplo de acidente aeronáutico envolvendo contaminação de combustível por água e, consequentemente, formação de gelo em sistemas internos da aeronave. Durante a aproximação final para o pouso, os dois motores apresentaram redução involuntária de potência, mesmo com o comando de aumento de potência emitido pela tripulação. Essa perda de potência resultou em resposta limitada dos motores, levando a aeronave a pousar cerca de 300 metros antes do início da pista do aeroporto. Felizmente não houve vítimas fatais, apesar dos 47 feridos no acidente (United Kingdom, 2010).

A agência britânica de investigação de acidentes aeronáuticos, a Air Accidents Investigation Branch (AAIB), conduziu a investigação deste acidente. O relatório final apontou que a causa do acidente foi a redução repentina de potência dos motores na fase final do pouso, na aproximação, logo antes do toque na pista. Segundo a investigação, houve acúmulo excessivo de gelo na entrada do sistema trocador de calor entre combustível e óleo, chamado Fuel/Oil Heat Exchanger (FOHE), o que gerou diminuição abrupta do fluxo de combustível para alimentação dos motores, causando "rollback", ou seja, perda de potência não comandada. Esse gelo é fruto do acúmulo de água na forma de umidade nos tanques, que entrou juntamente com ar via respiros ou reabastecimento (United Kingdom, 2010).

1.4 CASO 2: AERONAVES DA FORÇA AÉREA DOS ESTADOS UNIDOS - CONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA

O estudo de caso trazido neste trabalho contempla a análise de contaminação microbiológica de combustível em bases militares da Força Aérea dos Estados Unidos (USAF). O estudo foi realizado por Michelle E. Rauch ((Rauch *et al.*, 2006)) e outros autores, com o apoio da USAF, para caracterizar diversos tipos de microrganismos detectados em testes de contaminação microbiológica de combustíveis em diversas bases militares espalhadas pelo país. O objetivo foi investigar a diversidade e a dispersão destes microrganismos ao longo da cadeia de distribuição de combustível, desde o armazenamento até a aeronave (Rauch *et al.*, 2006).

O estudo se estendeu por 11 bases militares geograficamente distantes entre si, e contou com 36 amostras totais de combustível, tendo sido extraídas três amostras de cada uma das bases, sendo retiradas de maneira padronizada em todas elas: uma de um tanque de armazenamento de combustível acima do solo, uma de um caminhão-tanque utilizado em reabastecimentos e uma de um tanque de combustível de uma aeronave aleatória presente na base, sempre retirados do ponto mais baixo possível para coleta de amostras de cada sistema (Rauch *et al.*, 2006).

Neste estudo, um total de 12 gêneros de microrganismos foi isolado e identificado. Dentre todas as amostras analisadas, a espécie *Bacillus licheniformis* foi a mais frequentemente identificada, presente em 7 das 11 bases militares analisadas. Em duas das bases militares-alvo do estudo, os mesmos microrganismos foram encontrados em todos os três pontos de coleta de amostras (tanque externo, caminhão-tanque e aeronave) (Rauch *et al.*, 2006).

1.5 CASO 3: CONTAMINAÇÃO SEVERA DOS TANQUES DE COMBUSTÍVEL DE UM JATO EXECUTIVO GULFSTREAM

Este é um estudo de caso prático observado em uma rápida interação entre o autor deste trabalho e a tripulação de uma aeronave executiva com contaminação de combustível nas asas. Por se tratar de aeronave particular, há sigilo no caso e houve necessidade de preservação de algumas informações do caso, como a matrícula da aeronave, localização do fato, entre outras.

Neste caso, a aeronave foi enviada para revisão em uma oficina autorizada nos Estados Unidos, durante uma viagem do proprietário. Foi designado à tripulação que o jato fosse submetido a uma revisão geral, incluindo os motores, aproveitando a proximidade em que estavam da oficina. A equipe constatou, em meio aos seus serviços, contaminação do combustível por água e microrganismos, sendo classificada inicialmente como "leve"no tanque esquerdo e "moderada"no tanque direito. À época desta vistoria, a contaminação foi classificada como ponto de atenção, mas não afetava a aeronavegabilidade da aeronave, o que possibilitou o retorno dela ao Brasil.

Após alguns dias, uma nova avaliação da aeronave foi realizada em outra oficina, desta vez em território nacional, que constatou a persistência da contaminação dos tanques do avião: asa esquerda com contaminação moderada e asa esquerda com contaminação severa. A proliferação se deu devido à atitude tardia após a detecção da contaminação, o que permitiu mais tempo para a multiplicação dos microrganismos no interior do tanque de combustível. A falta de manutenção nos estágios iniciais da

contaminação provocou aumento da quantidade e da complexidade dos serviços necessários ao reparo e à recuperação da aeronave decorrentes do ocorrido. A manutenção corretiva, neste caso, é muito mais morosa e custosa do que a manutenção preventiva/preditiva.

1.6 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O estudo das contaminações de combustível em aeronaves é amplamente reconhecido como fundamental para a segurança de voo ((Rogers; Krynitsky; Churchill, 1963); (SHKILNIUK, I.; SHEVCHUK, N.,) e para todos os tipos de operações desejadas com aeronaves, uma vez que é esperado um bom desempenho e ausência de problemas relacionados à qualidade do combustível. Além disso, é possível expandir os estudos para mais vertentes do assunto: identificação de contaminações em tanques de aeronave, de estoque e de transporte; reação às contaminações identificadas, para manutenções precisas e seguras; e prevenção dessas contaminações.

O entendimento da cadeia de contaminação em combustíveis aeronáuticos é válido para entender: as diferentes vertentes da causa do problema abordado, traçando um histórico dos pontos da cadeia em que foram identificados a contaminação, para determinar a extensão do dano; pontos de fragilidade na cadeia de abastecimento das aeronaves, como o(s) ponto(s) exato(s) em que a contaminação ocorreu; tipo de contaminação sofrida; remediação do combustível contaminado, das aeronaves afetadas e dos intermediadores da cadeia que podem alastrar ainda mais a contaminação; e métodos de prevenção, para que seja cessada (ou pelo menos minimizada) a contaminação de combustível, seja qual for sua natureza (biológica, por água ou outros fatores que estão abordados neste trabalho).

2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho foi organizada para apresentar o tema de forma progressiva, partindo dos conceitos fundamentais até a análise aplicada dos estudos de caso e das recomendações finais. Inicialmente, são apresentados os objetivos do trabalho, o contexto e a relevância do tema, a partir da introdução, estabelecendo a relação entre a contaminação de combustível aeronáutico e a segurança operacional, com base nas normas e exigências regulamentares aplicáveis à aviação civil e militar.

Na sequência, na revisão bibliográfica, são abordados os principais tipos de combustíveis aeronáuticos utilizados no Brasil, bem como suas características físico-químicas e particularidades normativas. A partir dessa base conceitual, o trabalho discorre sobre os tipos de contaminação que podem ocorrer ao longo da cadeia logística do combustível, detalhando a origem, os mecanismos de formação e os efeitos no desempenho dos sistemas de alimentação das aeronaves. Ainda dentro dessa seção, são apresentados os métodos disponíveis para detecção e monitoramento, contemplando testes físico-químicos, análises visuais e procedimentos específicos empregados na prática operacional. Nessa seção, são apresentados os métodos disponíveis para detecção e monitoramento, incluindo

Posteriormente, são analisados os estudos de caso selecionados, com foco em eventos reais de contaminação de combustível. O primeiro estudo aborda o acidente com o Boeing 777 da British Airways, destacando a formação de gelo decorrente da presença de água no combustível e seus efeitos na operação da aeronave, que contribuíram para o acidente. O segundo estudo apresenta os resultados da pesquisa conduzida por Rauch sobre contaminação microbiológica em tanques de combustível da Força Aérea dos Estados Unidos, evidenciando o impacto operacional e as implicações para a manutenção aeronáutica.

Por fim, o trabalho apresenta recomendações e práticas preventivas fundamentadas nos conceitos discutidos e nos estudos analisados, contemplando aspectos relacionados ao recebimento, ao armazenamento, à inspeção, aos testes e ao abastecimento. A conclusão retoma os principais pontos discutidos ao longo do estudo, reforçando a importância do monitoramento contínuo, da padronização de procedimentos e da prevenção como instrumentos essenciais para a segurança das operações aéreas.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre a contaminação de combustível em aeronaves, com o propósito de servir de referência em estudos sobre o tema e de expor características, causas, consequências e propostas de recomendações de boas práticas, a fim de solucionar, amenizar e prevenir contaminações.

A contaminação de combustível em aeronaves é um fator crítico que pode comprometer a segurança de voo, a confiabilidade dos sistemas de propulsão e o desempenho operacional das aeronaves. Contaminantes como água, partículas sólidas, sedimentos, aditivos inadequados e microrganismos são os principais agentes que podem interferir no funcionamento dos sistemas de combustível, ocasionando falhas mecânicas, corrosão de componentes, entupimentos em filtros e linhas de alimentação, além de contribuir para a degradação do combustível estocado.

O estudo foi fundamentado em revisão bibliográfica, análise normativa e, principalmente, na investigação de estudos de caso reais, que permitirão observar como esses eventos ocorrem na prática, quais os desdobramentos técnicos e operacionais associados e de que forma as equipes de manutenção e operação atuam para mitigar os riscos envolvidos.

A pesquisa abordará ainda os procedimentos de boas práticas, envolvendo inspeção, controle de qualidade realizados durante o armazenamento e abastecimento de combustível, além das recomendações de fabricantes e autoridades aeronáuticas. Ao final, o trabalho pretende oferecer uma visão abrangente e aplicada do tema, contribuindo para a formação de profissionais capazes de reconhecer, prevenir e agir diante de situações de risco envolvendo a contaminação de combustível na aviação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS

Os combustíveis aeronáuticos são responsáveis por alimentar os motores das milhares de aeronaves que voam ao redor do mundo neste exato momento e são essenciais para o desempenho, a segurança e a confiabilidade das operações aéreas. Por isso, devem ser desenvolvidos segundo especificações rigorosas que visam garantir características importantes e desejáveis: estabilidade química, constância de desempenho na combustão e compatibilidade com os sistemas de propulsão, além de evitar danos ao sistema.

4.1.1 Ponto de Fulgor

Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP), o Ponto de Fulgor "está relacionado, principalmente, à segurança do transporte e manuseio do combustível, já que, por definição, o ponto de fulgor é a menor temperatura corrigida à pressão de 101,3 kPa (760 mmHg), na qual um combustível libera vapor em quantidade suficiente para causar ignição por uma fonte externa de calor" (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021b).

Ou seja, é a temperatura máxima segura para a manipulação do combustível, sem que haja autoignição, devido à quantidade de vapor liberado a essa temperatura. Quanto mais elevado o Ponto de Fulgor de um combustível, maior a margem de segurança para trabalhar com ele.

4.2 TIPOS DE COMBUSTÍVEIS AERONÁUTICOS

No Brasil, os dois principais tipos utilizados na aviação civil são o querosene de aviação (QAV-1, também conhecido como JET-A1) e a gasolina de aviação (AVGAS). Já no meio militar, o mais comum é o QAV-5 (ou JP-5), que apresenta características mais adequadas para aplicações militares. Em menor escala, temos também os biocombustíveis de aviação, que são mais recentes, em fase de testes e de início de implementação, prometendo ser menos agressivos ao meio ambiente, denominados Combustíveis Sustentáveis para Aviação (SAF, do inglês) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021a). Considerando a ampla utilização prática dos dois primeiros e o uso ainda reduzido do SAF, este trabalho foi realizado com base apenas no QAV-1 e na AVGAS. A seguir, será descrito e detalhado brevemente cada um dos tipos.

4.2.1 Querosene de Aviação: QAV-1

Segundo a Resolução ANP nº 856/2021, o Querosene de Aviação, ou QAV-1, é o produto brasileiro equivalente ao Jet-A1, utilizado internacionalmente. É definido como "um derivado de petróleo obtido por processos de refino, como o fracionamento por destilação atmosférica, contendo cadeias de 11 a 12 átomos de carbono e utilizado em motores a turbina." É o combustível aeronáutico padrão mais utilizado no mercado, especialmente na aviação civil. Este combustível é incolor, com ponto de

congelamento de -47 °C e ponto de fulgor de 60 °C (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021a).

4.2.2 Querosene de Aviação: QAV-5

Este combustível também é um querosene utilizado na aviação, mas com ajustes na fórmula para abranger uma gama de operações mais agressivas. É um combustível feito especialmente para a atividade militar, mais especificamente da Marinha e do Exército do Brasil, para missões que contemplem. Não se diferencia praticamente nada do QAV-1, exceto por suas características físico-químicas: apresenta o mesmo ponto de congelamento, -47 °C, mas com ponto de fulgor mais elevado: 60 °C. Para ser visualmente diferenciado do QAV-1, o QAV-5 apresenta coloração amarelada (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021a).

4.2.3 Gasolina de Aviação: AVGAS

Segundo a ANAC, é o combustível aeronáutico de menor aplicação, com alta octanagem, pois se destina a aeronaves de menor porte movidas a pistão. É utilizado em menor escala em relação aos anteriores, pois apresenta ponto de fulgor mais baixo, o que o torna mais instável para uso comercial (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022a).

4.3 TIPOS DE CONTAMINAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A contaminação de combustível em aeronaves pode ocorrer de diferentes formas e em diversas etapas do processo de armazenamento, transporte ou abastecimento. Em geral, há contaminação quando substâncias estranhas se misturam ao combustível, alterando suas propriedades físico-químicas e comprometendo seu desempenho. Esses contaminantes podem ter origem do ambiente ao redor, do armazenamento prévio ou atual do combustível, do não seguimento de procedimentos (drenagem por exemplo), ou de outras intempéries. A seguir, estão relacionados os tipos de contaminação de combustível que podem ser observados em aeronaves.

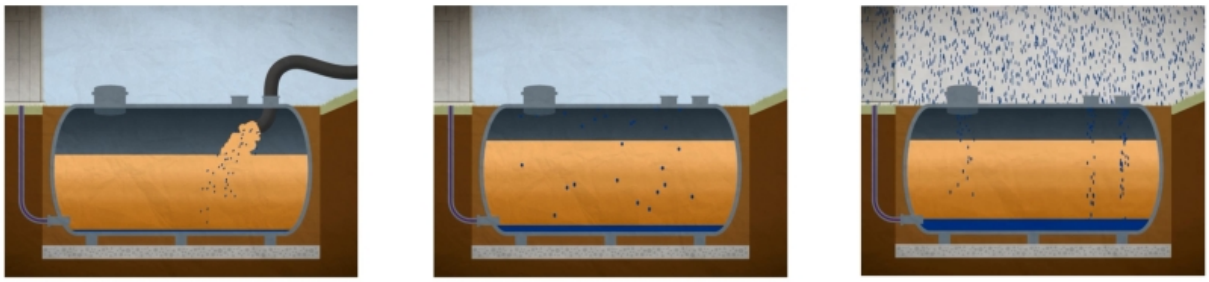
4.3.1 Contaminação por Água

A contaminação por água é uma das mais comuns e também a mais nociva ao sistema de abastecimento e alimentação de uma aeronave. Isso porque a simples presença da água na mistura do combustível já representa risco ao desempenho do motor e à segurança de voo, visto que é uma substância que altera quimicamente a mistura que entra na câmara de combustão, afetando severamente a queima do combustível e a extração de energia dessa reação.

Pode ser ocasionada por diversos fatores, o que a torna o tipo mais recorrente entre as contaminações, além de causar diversos efeitos indesejados, tornando sua presença, apesar de inevitável, perigosa quando ocorre em grandes quantidades. Existem parâmetros de tolerância de presença de água nos tanques de combustível, sendo a mais recente, publicada pelo FAA na AC 33.67-1 (United States of America, 2024), de 30ppm (razão entre água e combustível) para aviação civil e de apenas 15ppm na

aviação militar, para manter uma operação aceitável e segura dos motores, com padrões de exigência e suas respectivas missões a serem executadas (Rabelo, 2025).

Figura 1 – Contaminação por água de diferentes origens



Fonte: (IPU Group, 2025)

A presença de água pode gerar problemas como: formação de cristais de gelo no combustível, linhas e filtros do sistema; apagamento de turbinas em voo; proliferação e origem de outros contaminantes; entre outros. (Rabelo, 2025)

Dentre os meios de penetração da água em tanques de combustível estão:

- Infiltrações decorrentes de chuva: é a infiltração que ocorre através de selos, vedações e portas ao longo da superfície da asa da aeronave e nos tanques de combustível, conforme mostra a imagem à direita da Figura 1 (Rabelo, 2025).

- Lavagem de carros abastecedores: ocorre do mesmo modo que a primeira, mas em um estágio prévio na cadeia de abastecimento, já que essa água infiltra primeiramente nos tanques dos carros abastecedores e, depois, é transferida diretamente para o tanque da aeronave. À esquerda da Figura 1 é possível perceber como este combustível entra no tanque já contaminado (Rabelo, 2025).

- Condensação de umidade atmosférica: é inevitável, pois ocorre por meio da entrada de ar nos tanques de combustível. É necessário que o ar externo se desloque para dentro do tanque à medida que o combustível é consumido e sai do tanque. Este ar externo carrega inúmeras gotículas de água que entram no tanque por meio das ventilações, válvulas e respiros que ele possui. Por conta das variações de temperatura entre os componentes do avião e também as oscilações ao longo do dia, esta água presente internamente, que estava inicialmente no ar, condensa, se juntando ao combustível dentro do tanque. A imagem no centro da Figura 1 mostra este tipo de contaminação (Rabelo, 2025).

- Precipitação de orvalho: o orvalho presente na superfície da aeronave, principalmente próximo ao tanque de combustível, tem poder de penetração semelhante às infiltrações citadas anteriormente, decorrentes de chuva ou lavagens (Rabelo, 2025).

- Desgaseificação de tanque: é um processo necessário na manutenção aeronáutica para a inspeção ou limpeza dos tanques de combustível de uma aeronave. Consiste na remoção de gases tóxicos

e/ou inflamáveis e é realizada por meio de diferentes métodos, como ventilação, hidrojateamento ou vaporização, para a remoção dos gases nocivos e a substituição por gases inertes. Nestes métodos, percebe-se a inserção voluntária e inevitável de água, por meio do ar ou de jatos de água, no tanque (Rabelo, 2025).

A água pode se depositar no interior do tanque de maneiras diferentes, sendo elas:

- Em suspensão: é a água dissolvida no combustível, caso que se assemelha à umidade no ar. Este tipo de acúmulo de água é especialmente perigoso por ser pouco detectável visivelmente: como esta água está dissolvida no combustível, raramente será vista a olho nu, a não ser por uma comparação minuciosa realizada aproximando-se uma amostra de combustível certificadamente puro (Rabelo, 2025).
- Depositada: é toda a água em excesso que não se dissolverá no combustível, formando, assim, uma camada visível ao fundo do recipiente, percebida visualmente como outra fase deste líquido. Essa água se localiza ao fundo devido à sua densidade ser maior do que a do combustível. É nessa camada que se encontra um ambiente propício ao desenvolvimento de microrganismos (outro tipo de contaminação), o que pode gerar corrosão nos tanques e demais componentes da linha de combustível (Rabelo, 2025).

Existe também uma mistura entre combustível e água, que pode ocorrer, formando uma interação emulsificada entre os dois, detalhada no item “surfactantes”.

4.3.2 Contaminação por partículas sólidas

Partículas sólidas são todas as impurezas presentes no combustível. Por serem sólidas, quando absorvidas pelo sistema de combustível da aeronave, estas partículas podem gerar atrito em componentes móveis, impactos em superfícies de componentes, desgaste em bombas, válvulas, canalizações e sensores e saturação de filtros. Essas partículas podem ser macroscópicas (visíveis a olho nu) ou microscópicas (invisíveis a olho nu). São alguns exemplos de partículas sólidas: ferrugem, poeira, areia (Rabelo, 2025).

4.3.3 Contaminação microbiana

Este tipo de contaminação ocorre por meio da formação de colônias de microrganismos no interior do tanque da aeronave, na maioria das vezes na camada de água que se condiciona ao fundo do tanque, decantada, cujo ambiente se torna propício à proliferação desses organismos. Pode tratar-se de bactérias e fungos presentes tanto na água quanto no ar, ou até mesmo no próprio QAV, na forma de esporos, que contaminam os tanques (Rabelo, 2025).

Este tipo de contaminação é danoso fisicamente ao sistema de combustível da aeronave de duas formas: tanto pelo risco de obstrução dos filtros, visto que a união dessas colônias pode formar massas densas e viscosas, quanto pela corrosão que pode causar. A alimentação destes organismos baseia-se principalmente nos hidrocarbonetos do combustível, e seu desenvolvimento gera reações químicas que

podem formar ácidos, extremamente corrosivos para o sistema, especialmente para partes metálicas (Rabelo, 2025).

O desenvolvimento desses microrganismos e a formação de colônias são favorecidos principalmente pela presença de água, pela disponibilidade de nutrientes adequados à sua alimentação e pelo equilíbrio de temperaturas propícias ao seu crescimento.

4.3.4 Contaminação por Surfactantes

Os surfactantes, ou agentes tensoativos de superfície, são substâncias polares que reduzem expressivamente a *Tensão Interfacial* (TIF) entre a água e o combustível presentes no tanque. De maneira geral, são substâncias químicas derivadas de produtos utilizados em algum componente que acabam se depositando juntamente com a mistura de combustível com água presente no tanque, enfraquecendo as tensões superficiais entre os líquidos e fazendo com que ocorra uma mistura de aparência turva (Rabelo, 2025).

Podem ser resíduos de produtos químicos, como aditivos, utilizados na lavagem dos carros abastecedores, ou excedentes de outro combustível. Essa mistura entre esses produtos e a água presente no combustível pode fazer com que a água não decante, conforme esperado e mencionado anteriormente, mas permaneça emulsionada, formando uma mistura homogênea. Essa mistura é perigosa, pois passaria com maior facilidade pelos filtros do sistema, que deveriam filtrar essa água, contaminando a mistura que irá à combustão (Rabelo, 2025).

4.4 TESTES PARA DETECÇÃO DE CONTAMINAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

A qualidade dos combustíveis aeronáuticos a serem utilizados deve ser monitorada com frequência adequada e de forma correta, para que se mantenha um padrão aceitável de segurança de voo e de confiabilidade nas operações. Esta conferência deve ser realizada por meio de testes físico-químicos que asseguram a conformidade das características do combustível com as diretrizes estabelecidas por agências responsáveis e com as regulamentações vigentes.

Estes testes avaliam o combustível quanto à presença de água, à estabilidade das fases líquidas, à proliferação de colônias de microrganismos, etc. Os testes mais comuns utilizados na indústria aeronáutica atualmente, principalmente no meio militar no Brasil, estão listados a seguir.

4.4.1 Pasta Detectora de Água

A pasta detectora de água é um método simples e rápido utilizado para identificar a presença de água livre em combustíveis aeronáuticos. Trata-se de uma pasta viscosa que funciona como reagente químico, utilizada para a detecção visual de água. Ela apresenta coloração naturalmente neutra e inerte em relação ao combustível aeronáutico, como mostra a Figura 2. Porém, ao entrar em contato com a água, muda sua coloração em toda a região exposta a essa água, depositada na amostra de combustível, geralmente apresentando coloração rosada ou avermelhada.

Figura 2 – Pasta d'Água

Fonte: (Rabelo, 2025)

O procedimento é realizado com uma vareta graduada ou régua metálica limpa e seca, que alcance o fundo do recipiente de combustível em questão. É aplicada uma fina camada da pasta ao longo de toda a extremidade de uma das pontas da vareta/régua, conforme Figura 3. Em seguida, a vareta é inserida verticalmente até o fundo do tanque de combustível e mantida por alguns segundos, permitindo o contato entre a pasta e o conteúdo (Rabelo, 2025).

Figura 3 – Pasta aplicada na régua, em contato com água

Fonte: (Rabelo, 2025)

Após a remoção, é possível observar a coloração da pasta: se houver água, ocorre uma mudança de cor imediata, normalmente para uma coloração chamativa (rosada), como no caso da Figura 4). Essa reação indica a presença e a altura da camada de água depositada no fundo do tanque. Por ser um teste simples, de baixo custo e que não requer equipamentos adicionais, é amplamente utilizado nas inspeções de rotina em hangares, bases aéreas e pontos de abastecimento. Contudo, seu uso é limitado à detecção de água livre, não sendo capaz de identificar água dissolvida ou emulsificada no combustível (Rabelo, 2025).

Figura 4 – Resultado do teste com Pasta d'Água

Fonte: (Rabelo, 2025)

Constatada a contaminação do combustível, a eliminação desta água deverá ser realizada por meio da drenagem do combustível. Além disso, visto que a pasta é sensível a umidade, deve ser armazenada em seu próprio recipiente de fábrica, fechado e em local seco, longe de umidade e protegido do sol. Este teste deve ser utilizado a cada novo abastecimento dos tanques de armazenamento de combustível, sempre que houver abertura do tanque ou suspeita de contaminação decorrente do ambiente (Rabelo, 2025).

4.4.2 Exxon Hydrokit

O *Exxon Hydrokit* é um teste químico rápido utilizado para detectar pequenas quantidades de água em combustíveis de aviação. O teste contém reagentes químicos que alteram sua coloração ao entrar em contato com a água, de maneira semelhante ao teste de Pasta d'Água. A Figura 5 destaca o tubo de vidro com sais reagentes, pronto para uso.

Figura 5 – Tubo com sais reagentes

Fonte: Próprio Autor

Esses reagentes normalmente são sais de bário, como o carbonato de bário. Para a realização do teste, o kit contém: um tubo de vidro com o reagente, um frasco de vidro para a amostra do QAV, um suporte com agulha hipodérmica e uma cartela comparativa de cores ("passa/não passa"), conforme a Figura 6 (Rabelo, 2025).

Figura 6 – Teste Exxon Hydrokit

Fonte: (Rabelo, 2025)

O procedimento consiste em coletar uma amostra representativa de combustível em um frasco limpo e seco, preenchido até a metade, evitando agitação excessiva. Em seguida, utiliza-se o suporte

da agulha, mergulhado até 3/4 no combustível, com a agulha voltada para cima. o tubo com reagentes é posicionado, prestes a ser inserido, permitindo o combustível fluir do recipiente de vidro para o tubo de teste, conforme Figura 7. Ao pressionar o tubo contra a agulha, a agulha perfura a vedação do tubo e permite a entrada de combustível. O tubo deve ser preenchido praticamente por completo (Rabelo, 2025).

Figura 7 – posicionamento de agulha e tubo para teste

Fonte: (Rabelo, 2025)

O combustível e o reagente são misturados suavemente, por agitação manual, durante aproximadamente 15 segundos. Após a reação, o operador compara a coloração do líquido à escala fornecida no próprio kit. A coloração branca indica combustível puro, sem contaminação, conforme a ilustração da Figura 8, enquanto a coloração alterada indica que a amostra de combustível está contaminada (Rabelo, 2025).

Figura 8 – Coloração branca: combustível não contaminado

Fonte: (Rabelo, 2025)

A alteração da coloração no tubo pode ocorrer de duas formas: parcial ou forte. Uma alteração parcial da coloração para um rosado claro indica que o combustível está contaminado com água em proporções inferiores a 30 ppm (partes por milhão). Ao ser comparado à escala "passa/não passa", este nível de contaminação é considerado aceitável e o combustível poderá ser utilizado sem qualquer preparo ou processo de separação. Já a coloração rosa forte indica a presença de água em proporções acima do aceitável, conforme a Figura 9, e não deve ser utilizada de maneira direta. Para isso, será necessário drená-lo antes de sua utilização (Rabelo, 2025).

Figura 9 – Coloração rosada: combustível contaminado

Fonte: (Rabelo, 2025)

A principal vantagem do método é sua alta sensibilidade, que o permite identificar níveis de contaminação imperceptíveis visualmente. É um teste prático e indicado para verificações diárias em aeronaves, caminhões abastecedores e tanques de armazenamento. Deve ser realizado após transferências de combustível para reservatórios, após novos abastecimentos e durante inspeções minuciosas dos sistemas de combustível da aeronave, a fim de garantir a ausência de água em determinados setores do sistema.

4.4.3 Shell Water Detector

O *Shell Water Detector* é outro teste químico amplamente utilizado para detectar a presença de água no combustível aeronáutico. Por definição, segundo (Rabelo, 2025), são pequenas cápsulas de plástico, em cujo interior está instalado um disco de papel filtrante, embebido em um reagente químico, que acusa a presença de água visualmente, assim como nos testes anteriores, por meio da alteração de cor da mistura após a conclusão (SHELL, 2025).

Figura 10 – Shell Water Detector

Fonte: Próprio Autor

Sua embalagem pode variar de acordo com o fornecedor do teste, sendo o amarelo da Figura 10, fornecido pela fabricante britânica Shell, enquanto o azul da Figura 11 é fornecido pela companhia chinesa CASRI. Ambos têm a mesma funcionalidade, sendo fabricados por empresas diferentes e concorrentes no mercado aeronáutico. Na visita técnica realizada ao *BAvEx*, foi possível verificar os dois modelos, provenientes de diferentes lotes comprados pelo Exército Brasileiro.

Figura 11 – CASRI Water Detector

Fonte: Próprio Autor

O kit de teste contém apenas as cápsulas detectoras. Adicionalmente, é necessário que se tenha uma seringa comum, sem agulha, para o encaixe da cápsula e a manipulação do combustível. O procedimento para a realização deste teste consiste em acoplar uma cápsula detectora à extremidade de uma seringa plástica comum. Em seguida, a ponta da seringa (com a cápsula) é submergida na amostra de combustível, e o combustível é aspirado pela seringa, forçado a passar pelo filtro de teste. Caso haja água presente, o reagente muda de cor (Rabelo, 2025).

No exemplo realizado, o filtro, originalmente branco, tornou-se azul-escuro ao entrar em contato com a água presente, o que indica contaminação do combustível, conforme a Figura 12. Nela, estão em destaque duas cápsulas: uma original de fábrica, branca, antes de ser utilizada, e outra azul-escuro, já utilizada em um teste com amostra contaminada, indicando a presença de água.

Figura 12 – Comparação de cápsulas teste

Fonte: Próprio Autor

Cada cápsula é descartável e deve ser utilizada apenas uma vez. Este método é eficaz para detectar pequenas quantidades de água livre e emulsificada, sendo um dos mais utilizados na rotina de inspeção em solo, especialmente antes do abastecimento, justamente por ser rápido, prático e suficientemente preciso. A aplicação deste teste é obrigatória antes de novos abastecimentos, no recebimento de novas cargas de combustível e/ou após a exposição dos componentes da logística desse combustível ao ambiente externo (Rabelo, 2025).

4.4.4 Millipore

O teste Millipore é um método de filtragem, utilizado para determinar o nível de contaminação por partículas sólidas no combustível aeronáutico. Este kit contempla dois testes distintos, com o objetivo de realizar dois tipos de análise: ensaio colorimétrico e ensaio gravimétrico (MILLIPORE, 2025).

O ensaio colorimétrico compara a coloração final do filtro testado à escala comparativa fornecida pelo fabricante, a fim de avaliar a contaminação do combustível decorrente de alterações na coloração do filtro, de acordo com sua sujidade. A coloração escurecida da membrana indica a presença de impurezas na amostra, como ferrugem, poeira ou resíduos de componentes do próprio sistema de combustível. Este é o teste que utiliza o monitor com tampas vermelhas e azuis, conforme 13a. Este monitor utiliza uma única membrana para realizar o teste (Rabelo, 2025).

Já o ensaio gravimétrico compara o peso final dos filtros utilizados no teste: o primeiro irá reter as partículas sólidas, enquanto ambos absorverão um pouco de líquido durante a filtragem. Quanto maior a diferença de peso observada em relação aos valores predeterminados e tabelados pelo fabricante, maior a quantidade de partículas retidas pela primeira membrana, o que indica maior contaminação do combustível. Este é o teste que utiliza o monitor com tampas Vermelha e Amarela, da 13b, e é realizado com duas membranas inseridas no monitor (Rabelo, 2025).

Para a realização do teste, inicia-se o procedimento com a montagem do sistema de filtragem, composto por uma bomba de vácuo ou seringa, um suporte de filtro e uma membrana microporosa branca, normalmente de 0,8 µm de porosidade (lembrando da variação na organização dos testes, entre uma membrana única para o ensaio colorimétrico ou duas membranas para o gravimétrico) (MILLIPORE, 2025).

Figura 13 – Diferença entre os monitores de teste Millipore

(a) Teste Millipore colorimétrico (b) Teste Millipore gravimétrico

Fonte: Adaptado (MILLIPORE, 2025)

Para ambos, uma amostra de combustível de 5 litros deve ser reservada para teste. Esse combustível será filtrado por meio do monitor e das membranas desejados. Caso necessário, pode-se realizar análise microscópica para identificar o tipo de partícula retida nas filtragens. É importante observar que o teste colorimétrico deve ser realizado mensalmente nos combustíveis armazenados, enquanto o gravimétrico deve ser realizado trimestralmente, para garantir níveis aceitáveis de pureza do combustível a ser armazenado ou utilizado. Este teste também é recomendado no recebimento de novas cargas de combustível e antes de abastecimentos (Rabelo, 2025).

4.4.5 Límpido e Transparente

O teste Límpido e Transparente é o mais básico e direto dos procedimentos de inspeção de combustível, além de ser o mais simples de realizar, por exigir apenas um recipiente de vidro transparente, incolor, com fundo claro e tampa. O teste consiste na análise visual da amostra coletada, sob iluminação suficiente para permitir a visualização clara do interior do vidro (Rabelo, 2025).

Para iniciar o teste, é necessário conferir se o recipiente de vidro está limpo e seco, bem como o bico da mangueira ou do extrator de onde a amostra de combustível será retirada. Após essa conferência, é possível extrair a amostra de combustível a ser analisada. Ao encher o recipiente de vidro, deve-se garantir que ele seja preenchido até 2/3 do seu volume total, conforme a Figura 14:

Figura 14 – Recipiente ideal para teste límpido e transparente

Fonte: (Rabelo, 2025)

O operador deve tampar o vidro corretamente e, em seguida, agitá-lo com movimentos circulares rápidos para gerar um vórtex no fluido. Neste momento, o combustível deve ser observado contra um fundo claro e, depois, contra um fundo escuro, verificando se há turvação, partículas em suspensão, sedimentos ou alteração de coloração. O combustível deve apresentar-se límpido, homogêneo e transparente, sem partículas em suspensão ou depositadas no fundo. Caso o líquido apresente aspecto turvo, formação de bolhas ou coloração anormal, há indícios de contaminação por água, partículas sólidas ou mistura com outro combustível (Rabelo, 2025).

A definição específica do tipo de contaminante poderá ser realizada com base na aplicação de outros testes e análises aprofundados. A aplicação deste teste é obrigatória, com a maior frequência possível, em todos os momentos da manipulação do combustível, à medida que necessário (Rabelo, 2025).

Figura 15 – Vórtice observado durante o teste

Fonte: (Rabelo, 2025)

4.4.6 Densidade e temperatura

O teste de Densidade e Temperatura toma como parâmetros as características químico-físicas do combustível em comparação com dados próprios do combustível puro, analisados previamente em laboratório, fornecidos pelo fabricante do combustível. O intuito é garantir que os parâmetros analisados na amostra estejam dentro dos limites estabelecidos pela instrução; caso contrário, há indícios de contaminação por outros componentes. Para este teste, é necessário: um densímetro graduado de 0,750 a 0,850 g/mL (gramas por mililitro), um termômetro e uma proveta com capacidade de 1.000 mL. A Figura 16 ilustra os itens necessários:

Figura 16 – Material para teste Densidade e Temperatura

Fonte: (Rabelo, 2025)

Figura 17 – Teste em andamento

Fonte: (Rabelo, 2025)

O teste deve ser realizado da seguinte maneira: a amostra de combustível é coletada na proveta, na qual também são inseridos o termômetro e o densímetro, conforme Figura 17. Os componentes devem ser deixados em repouso por 5 minutos, até que a leitura dos instrumentos seja correta. Após esse período, a temperatura e a densidade devem ser coletadas para realizar a conferência matemática com a escala. Com estes dados coletados, é necessário ajustar a temperatura à tabela específica estabelecida pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022b).

Os valores da tabela de referência ajudam a calcular a conversão da densidade para a temperatura padrão de análise (25 °C) e a compará-la ao valor interpolado da tabela da Agência Nacional do Petróleo (ANP). Os valores devem convergir e não ultrapassar uma diferença de densidade de ±0,003 kg/m^3. Caso o valor da densidade obtido após a correção permaneça fora dos valores de referência, há indícios de contaminação do combustível. Este teste é amplamente utilizado em inspeções de recebimento e de liberação de combustível em aeroportos e bases militares, garantindo que o produto esteja dentro dos parâmetros exigidos (Rabelo, 2025).

Este teste deve ser realizado sempre ao receber novas cargas de combustível, seja do fornecedor ou de outros pontos de armazenamento (Rabelo, 2025).

4.4.7 Microb Monitor Test Kit

O kit de teste Microb Monitor é utilizado na detecção de contaminação de combustível por meio de culturas de micro-organismos, muitas vezes invisíveis a olho nu em pequenas quantidades. O teste é composto por dois vidros transparentes, sendo um "detector"e o segundo de "controle", nos quais o combustível é inserido, com o objetivo de formar, em um, um ambiente propício à proliferação destes micro-organismos e, no outro, o contrário.

Desta forma, definem-se os frascos da seguinte maneira:

- Frasco A - Detector: contém uma mistura de água, ar e óleo. Quando há presença de micro-organismos, esses componentes formam um ambiente perfeito para sua multiplicação e proliferação. Este é o frasco que pode apresentar alterações na coloração do líquido, aumento na quantidade de "manchas"de colônias de bactérias e de fungos, etc.

- Frasco B - Controle: além da mistura anterior, este frasco contém também um biocida, que inibe a proliferação dos micro-organismos e atua contra a vida desses organismos, tornando o ambiente totalmente inabitável. O objetivo é ter um frasco visualmente intacto para comparação com o frasco A após o período de incubação.

O teste começa com a inserção de 1 mL de amostra de combustível em cada frasco, com o auxílio de uma seringa. Deve-se agitar levemente os frascos para permitir o contato entre todas as fases dos líquidos. Depois, eles serão armazenados em uma maleta ou em outro local escuro, à temperatura ambiente (entre 20 °C e 30 °C). Depois, eles serão armazenados em uma maleta ou outro local escuro, à temperatura ambiente (entre 20 °C e 30 °C), para favorecer a proliferação de bactérias e fungos de maneira acelerada. Os frascos devem ser deixados em repouso por, no mínimo, 24 horas (Rabelo, 2025).

Figura 18 – Frascos do Microb Monitor Test Kit

Fonte: Próprio Autor

Após esse período de incubação, caso haja contaminação do combustível, é esperado que haja alteração na coloração do Frasco A - Detector, como na Figura 18, além da formação de colônias, provavelmente visíveis. No caso específico do teste da foto, que foi deixado em repouso por tempo suficiente, é possível observar nitidamente a formação de densas colônias de microrganismos. O frasco B - Controle servirá como parâmetro visual inicial para se analisar qualquer discrepância que o frasco A apresentar.

Este teste apresenta vantagem sobre a identificação de contaminação microbiótica por permitir detectá-la ainda em estágios iniciais, permitindo que, uma vez identificada a contaminação, seja tratada prontamente, podendo evitar desperdício de combustível no futuro (caso haja proliferação, pode ser necessário até mesmo descarte completo do combustível) e economizar manutenções imprevistas na linha de combustível, como desgaste e falha de componentes do sistema de combustível da aeronave (Rabelo, 2025).

Este teste deve ser utilizado sempre que houver suposta contaminação de combustível armazenado há algum tempo, geralmente próximo de sua validade final, para garantir a qualidade do combustível antes de seu consumo (Rauch *et al.*, 2006).

5 ESTUDOS DE CASO

5.1 CONTAMINAÇÃO POR ÁGUA: ACIDENTE COM BOEING 777-236, BRITISH AIRWAYS, EM 17 DE JANEIRO DE 2008

O primeiro estudo de caso apresentado neste trabalho é o acidente com o Boeing 777-236ER, matrícula G-YMMM, operado pela British Airways, ocorrido em 17 de janeiro de 2008 no Aeroporto de Londres Heathrow, na Inglaterra. Ele se tornou uma das referências mais relevantes nos estudos sobre contaminação de combustível por água e formação de gelo em sistemas de alimentação de aeronaves justamente por se tratar de um acidente ocorrido na aviação comercial, investigado por um órgão competente que emitiu um extenso relatório final e é contemporâneo, o que demonstra a necessidade de continuidade de estudos na área de investigação e prevenção de contaminação de combustível aeronáutico (United Kingdom, 2010).

Figura 19 – Boeing 777-236 da British Airways acidentado

Fonte: Adaptado (United Kingdom, 2010)

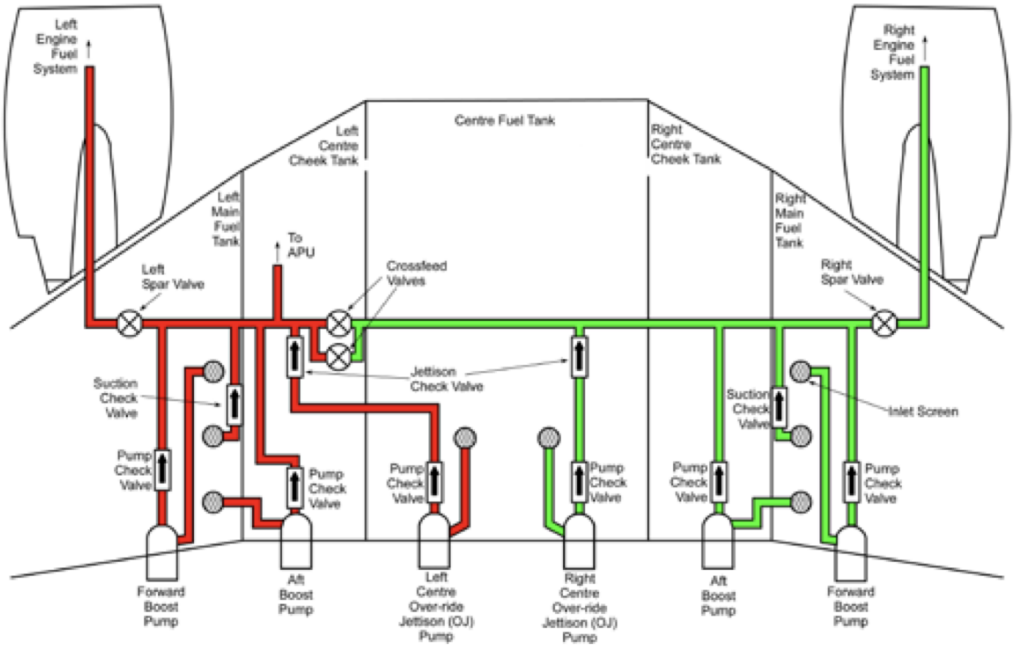
Segundo o relatório oficial de investigação, conduzido pela Air Accidents Investigation Branch (AAIB) e publicado dois anos após o acidente, em 2010, a aeronave apresentou perda progressiva de potência em ambos os motores durante a fase final de aproximação para o pouso, momento em que seria esperado um aumento de empuxo para ajustes finais da trajetória de descida, procedimento padrão nas operações da aviação (United Kingdom, 2010).

A perda de potência ocorreu mesmo com o avanço das manetes; ou seja, não houve resposta do motor aos comandos dos pilotos, o que levou a aeronave a perder velocidade e sustentação e a pousar antes do início da pista do aeroporto. O pouso precoce ocorreu cerca de 300 metros antes do ponto de toque ideal previsto para a pista 27L do aeroporto Heathrow, conforme Figura 19. Devido à força

do impacto, os trens de pouso colapsaram e a aeronave sofreu danos graves. Felizmente não houve vítimas fatais. Das 152 pessoas a bordo, 47 ficaram feridas no acidente (United Kingdom, 2010).

A agência britânica de investigação de acidentes aeronáuticos, a AAIB, conduziu a investigação deste acidente. O relatório final apontou que a causa do acidente foi a redução repentina de potência dos motores na fase final do pouso, na aproximação, logo antes do toque na pista, devido a um fenômeno chamado *rollback* ocorrido nos motores: mesmo com comando para aumento de potência, os motores reduziram seu empuxo quase de volta para *idle*, sem produzir força alguma. Segundo a investigação, houve acúmulo excessivo de gelo na entrada do sistema trocador de calor entre combustível e óleo, chamado *Fuel/Oil Heat Exchanger* (FOHE), o que resultou em diminuição abrupta do fluxo de combustível para alimentação dos motores, causando o *rollback*, ou seja, perda de potência não comandada. A Figura 20 mostra detalhadamente o sistema de alimentação de combustível antes de chegar aos motores. Na Figura 22 é possível ver tanto o esquema de entrada de combustível da *FOHE* quanto sua grade colmeia de entrada (United Kingdom, 2010).

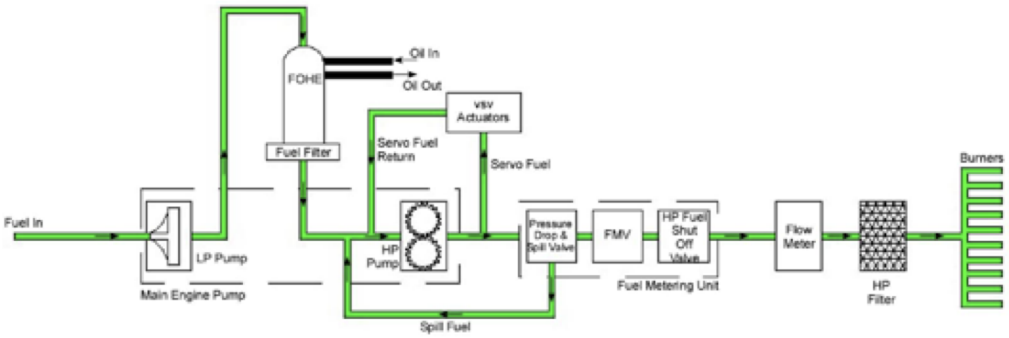
Figura 20 – Esquema do circuito de alimentação de combustível dos motores do 777-200



Fonte: Adaptado (United Kingdom, 2010)

O *FOHE* é um sistema extremamente eficiente, desenvolvido para otimizar as trocas de calor necessárias nos sistemas do avião. As linhas de óleo do motor necessitam de resfriamento para manter o arrefecimento. Ao mesmo tempo, o combustível dos tanques deve ser aquecido para evitar o congelamento, devido às baixas temperaturas em voo. O sistema *FOHE* é exatamente a interligação entre esses dois sistemas que realiza sua troca de calor: o combustível, mais frio, absorve calor do óleo do motor, mais quente, como se pode observar na Figura 21:

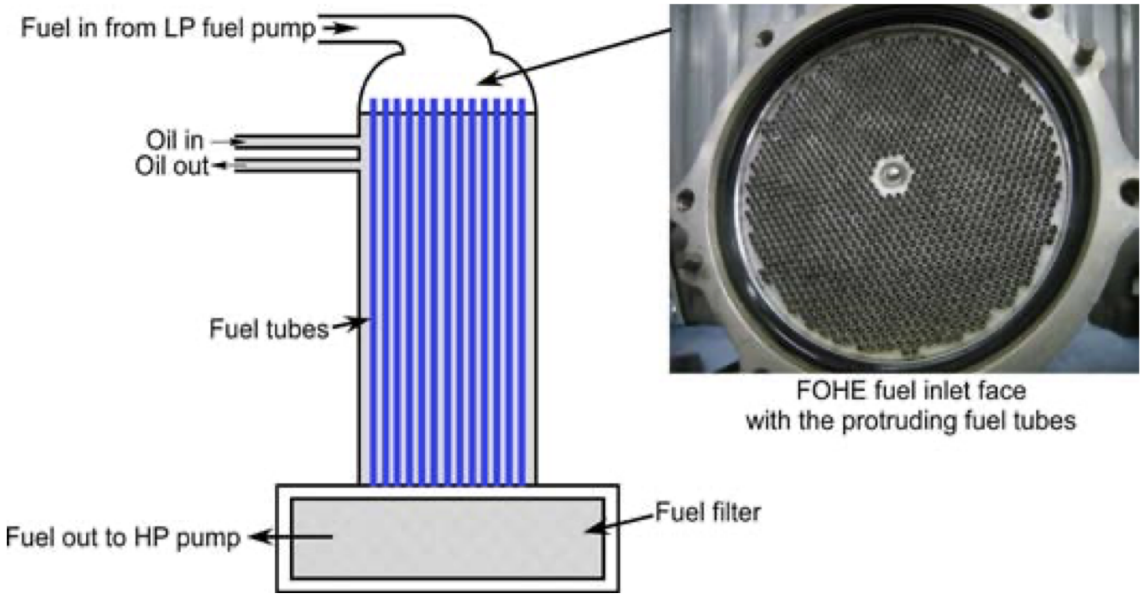
Figura 21 – Esquema do circuito do combustível com *FOHE*



Fonte: Adaptado (United Kingdom, 2010)

A investigação concluiu que o *rollback* foi causado pela restrição repentina do fluxo de combustível direcionado aos motores, provocada pelo bloqueio da entrada de combustível no FOHE para o interior do sistema. Durante o voo de cruzeiro em atmosfera extremamente fria (próxima de -60 °C), pequenas quantidades de água presentes no tanque de combustível, ainda dentro dos limites considerados aceitáveis para essa aeronave, formaram cristais de gelo. Essa água provavelmente é proveniente da condensação da umidade presente no próprio ar do tanque, que é aspirada pelo sistema de respiro do tanque à medida que o combustível é consumido. O relatório aponta que esses cristais permaneceram dispersos no sistema sem causar interferência durante o voo, pois o relatório do fluxo de combustível para os motores demonstrou ser estável (United Kingdom, 2010).

Figura 22 – Grade "colmeia"na entrada da *FOHE*



Fonte: Adaptado (United Kingdom, 2010)

O documento destaca que tanto o combustível utilizado quanto os procedimentos de abastecimento e inspeção estavam em conformidade com os padrões vigentes na época. Além disso, o sistema de combustível e o projeto dos motores atendiam plenamente aos requisitos de certificação. Por esse motivo, a investigação classificou o evento como resultado da combinação de fatores operacionais

específicos: voo prolongado em baixas temperaturas, presença natural e inevitável de água no combustível e alteração rápida de regime de fluxo nos momentos finais do voo. Além disso, foram emitidas diversas diretrizes e recomendações à fabricante, aos operadores e às agências reguladoras após este acidente. Inclusive, a fabricante *Boeing* alterou o design da grade colmeia na entrada da *FOHE*, a fim de evitar o acúmulo de gelo (United Kingdom, 2010).

Figura 23 – Acúmulo de gelo visível na *FOHE*

Fonte: Adaptado (United Kingdom, 2010)

Este acidente representa um marco importante no entendimento sobre a água presente no combustível aeronáutico, demonstrando que, mesmo quando se trabalha dentro dos limites regulamentares, a água pode se tornar um fator crítico em determinadas condições operacionais. No contexto deste trabalho, este estudo evidencia a importância do controle rigoroso da presença de água no combustível e reforça a necessidade de procedimentos capazes de identificar e mitigar efeitos, como a formação de gelo, ao longo do sistema de alimentação. O caso também demonstra que a prevenção de contaminações não deve se limitar às condições estáticas do combustível no momento do abastecimento, mas deve considerar os efeitos térmicos, operacionais e dinâmicos ao longo do voo.

5.2 CONTAMINAÇÃO BIOLÓGICA: CARACTERIZAÇÃO DE CONTAMINAÇÃO MICROBIANA EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL AERONÁUTICO NA FORÇA AÉREA DOS ESTADOS UNIDOS

A contaminação por microrganismos no combustível aeronáutico é um problema sério que pode causar diversos prejuízos para o funcionamento das aeronaves, conforme já observado ao longo de todo este trabalho, visto que esses microrganismos, que são na maioria bactérias e fungos, conseguem

crescer e se multiplicar dentro dos tanques e/ou linhas de combustível, podendo ocasionar em diversos dos problemas apresentados até aqui. Este segundo estudo de caso selecionado foi realizado nos Estados Unidos e buscou compreender melhor esse problema, investigando onde esses microrganismos mais se manifestam, como se desenvolvem e o que isso pode causar nos sistemas de combustível das aeronaves da Força Aérea dos Estados Unidos, a *USAF*.

O estudo se estendeu por 11 bases militares geograficamente distantes entre si, e contou com 36 amostras totais de combustível, tendo sido extraídas três amostras de cada uma das bases, sendo retiradas de maneira padronizada em todas elas: uma de um tanque de armazenamento de combustível acima do solo, uma de um caminhão-tanque utilizado em reabastecimentos e uma de um tanque de combustível de uma aeronave aleatória presente na base, sempre retirados do ponto mais baixo possível para coleta de amostras de cada sistema (Rauch *et al.*, 2006).

Neste estudo, um total de 12 gêneros de microrganismos foi isolado e identificado. Dentre todas as amostras analisadas, a espécie *Bacillus licheniformis* foi a mais frequentemente identificada, presente em 7 das 11 bases militares analisadas. Além disso, 6 espécies de bactérias e uma de fungos jamais haviam sido reportadas em combustíveis aeronáuticos da USAF. Este fato foi atribuído a "variações na comunidade de microrganismos contaminantes em resposta a alterações na composição de combustíveis de aviação, a aditivos e biocidas utilizados na prevenção de contaminações e a melhorias nas técnicas de isolamento e identificação", segundo Rauch. Em duas das bases militares-alvo do estudo, os mesmos microrganismos foram encontrados em todos os três pontos de coleta de amostras (tanque externo, caminhão-tanque e aeronave) (Rauch *et al.*, 2006).

O foco principal da autora nesta pesquisa foi descobrir quais tipos de microrganismos estão presentes no combustível de aviação, como se multiplicam e o quanto isso pode prejudicar as peças e os sistemas que transportam e armazenam esse combustível. Para isso, Michelle E. Rauch e seus colaboradores, no trabalho, coletaram diversas amostras de combustível em diferentes bases aéreas dos Estados Unidos, como tanques de aviões, tanques de armazenamento e até caminhões que transportam combustível aos aviões.

Um dos fatores que mais contribuíram para o crescimento desses microrganismos, juntamente com a temperatura ideal, foi a presença de água no combustível. Mesmo com uma quantidade pequena de água, já se cria um ambiente ideal pra esses organismos sobreviverem, já que ela cria um ambiente mais estável para sua sobrevivência, menos agressivo do que o combustível, ainda que possam se alimentar dos carbonetos presentes nele (Rauch *et al.*, 2006).

A temperatura também desempenhou um papel importante: quando os tanques estavam em temperatura amena, o crescimento era maior, segundo a autora. Já em temperaturas muito altas ou muito baixas, os microrganismos não se desenvolviam tão bem. O tempo que o combustível permanece parado e os próprios componentes químicos do combustível também influenciaram o aumento ou a diminuição dessa contaminação (Rauch *et al.*, 2006).

Os resultados mostraram que essa contaminação pode ocorrer em várias etapas do processo de abastecimento, desde o armazenamento até o interior do próprio avião. Das amostras coletadas, diversas apontaram contaminação em mais de uma das partes da base, seja no tanque externo, no caminhão-tanque ou na própria aeronave.

Os fungos e bactérias que foram encontrados são capazes de criar uma espécie de lodo, que gruda nas paredes do tanque e em outras partes do sistema, podendo entupir filtros e tubulações. Além disso, alguns deles causam corrosão, o que enfraquece as estruturas dos tanques e pode provocar vazamentos. Outra consequência é que eles podem mudar a qualidade do combustível, alterando-o quimicamente devido ao consumo e/ou liberação de substâncias químicas, fazendo com que ele não queime de maneira ideal e reduza o desempenho do motor, levando a possíveis falhas com maior probabilidade e frequência, tanto por qualidade de combustível (afeta a combustão) quanto pelo bloqueio das linhas de circulação do combustível (Rauch *et al.*, 2006).

O estudo deixou bem claro que esse tipo de contaminação é comum nos EUA, assim como no resto do mundo, e que representa um desafio que ainda requer muita atenção. Esses microrganismos conseguem se adaptar facilmente ao ambiente e até se alimentam dos próprios compostos presentes no combustível, o que torna tudo ainda mais complicado. Por isso, a pesquisa de Rauch recomenda a adoção de medidas pra evitar o crescimento desses microrganismos (Rauch *et al.*, 2006). Entre essas medidas estão o controle frequente da presença de água nos tanques, a limpeza regular dos sistemas e o uso de biocidas, sem comprometer a qualidade do combustível.

5.3 CONTAMINAÇÃO NOS TANQUES DE COMBUSTÍVEL DE UM JATO EXECUTIVO GULFSTREAM

Este é um estudo de caso prático observado em uma rápida interação entre o autor deste trabalho e a tripulação de uma aeronave executiva com contaminação de combustível nas asas. Por se tratar de aeronave particular, há sigilo no caso e houve necessidade de preservação de algumas informações do caso, como a matrícula da aeronave, localização do fato, entre outras.

Trata-se de uma aeronave a jato particular da fabricante Gulfstream, cujo modelo é o mesmo da Figura 24. É um jato executivo de alto padrão e alto desempenho, comportando com muito conforto em torno de 10 a 12 passageiros, com alcance de quase 7.000 quilômetros de distância, permitindo viagens intercontinentais sem escalas.

Figura 24 – Jato executivo Gulfstream G280

Fonte: Adaptado (ALMEIDA, Tiago Andre De, 2024)

Neste caso, a aeronave foi enviada para revisão em uma oficina autorizada nos Estados Unidos, durante uma viagem do proprietário. Foi designado à tripulação que o jato fosse submetido a uma revisão geral, incluindo os motores, aproveitando a proximidade em que estavam da oficina. A equipe constatou, em meio aos seus serviços, contaminação do combustível por água e microrganismos, sendo classificada inicialmente como "leve"no tanque esquerdo e "moderada"no tanque direito. À época desta vistoria, a contaminação foi classificada como ponto de atenção, mas não afetava a aeronavegabilidade da aeronave, o que possibilitou o retorno dela ao Brasil.

Figura 25 – Coleta de amostra de combustível

Fonte: General Aviation News

Após alguns dias, uma nova avaliação da aeronave foi realizada em outra oficina, desta vez em território nacional, que confirmou a contaminação detectada anteriormente. Este novo teste, realizado já no Brasil, foi semelhante ao da Figura 26.

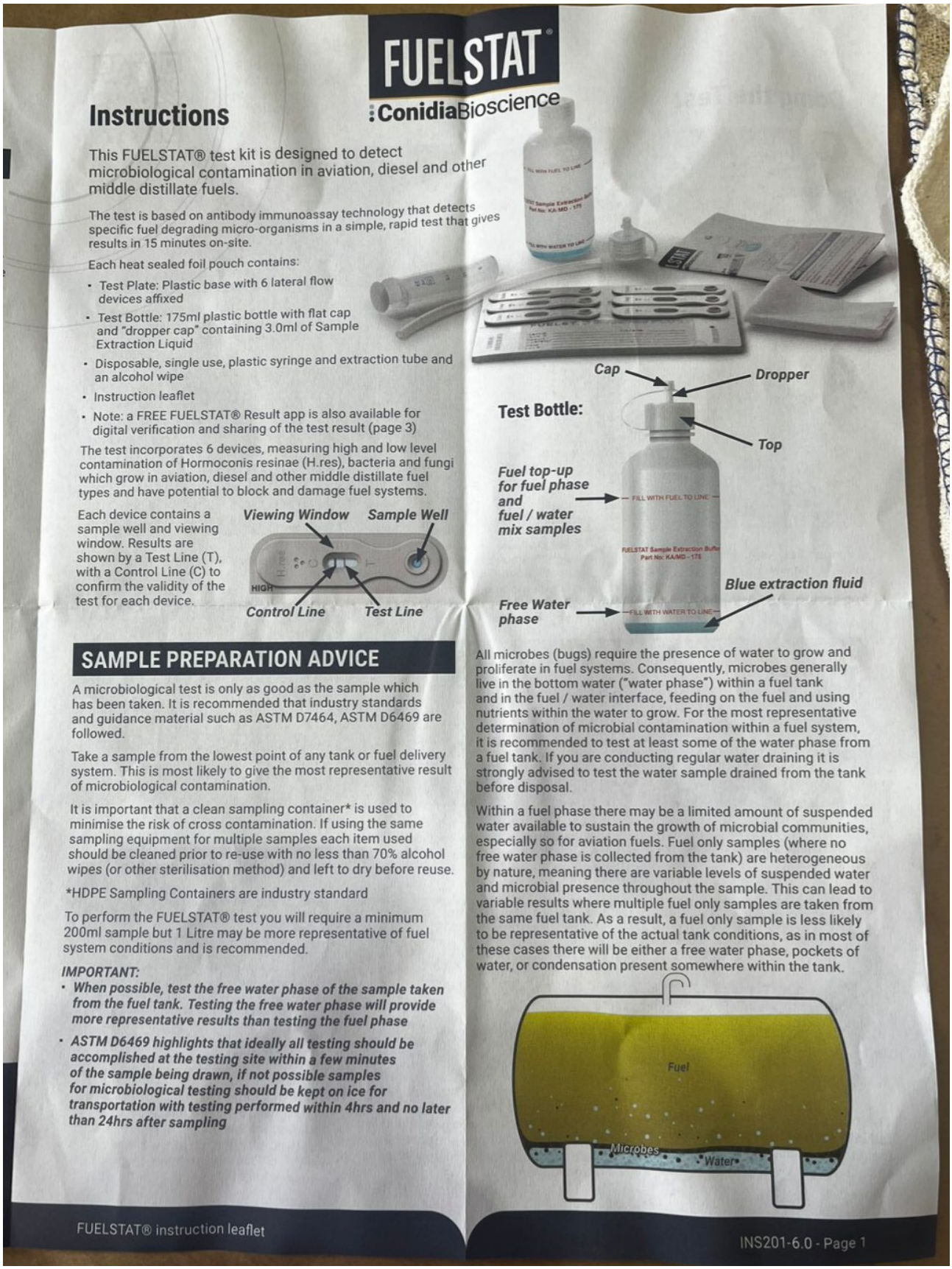
Figura 26 – Teste FUELSTAT resinae Plus

(a) Embalagem do teste (b) Material necessário

Fonte: Próprio Autor

Este teste é utilizado para a detecção de contaminação microbiológica no combustível, em uma faixa de severidade estabelecida em seu manual. O manual do teste está disponível abaixo. Ele indica o funcionamento do teste, a forma de realizá-lo, a leitura dos resultados e a interpretação correta. É possível detectar contaminações "insignificantes", com pouquíssima ou nenhuma contaminação; "moderadas", com contaminação detectada e que ações devem ser tomadas; e "severas", exigindo intervenção imediata, conforme a Figura 29. O manual está anexado aqui, na forma das figuras seguintes, entre a Figura 27 e a Figura 30:

Figura 27 – Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Coleta de amostra

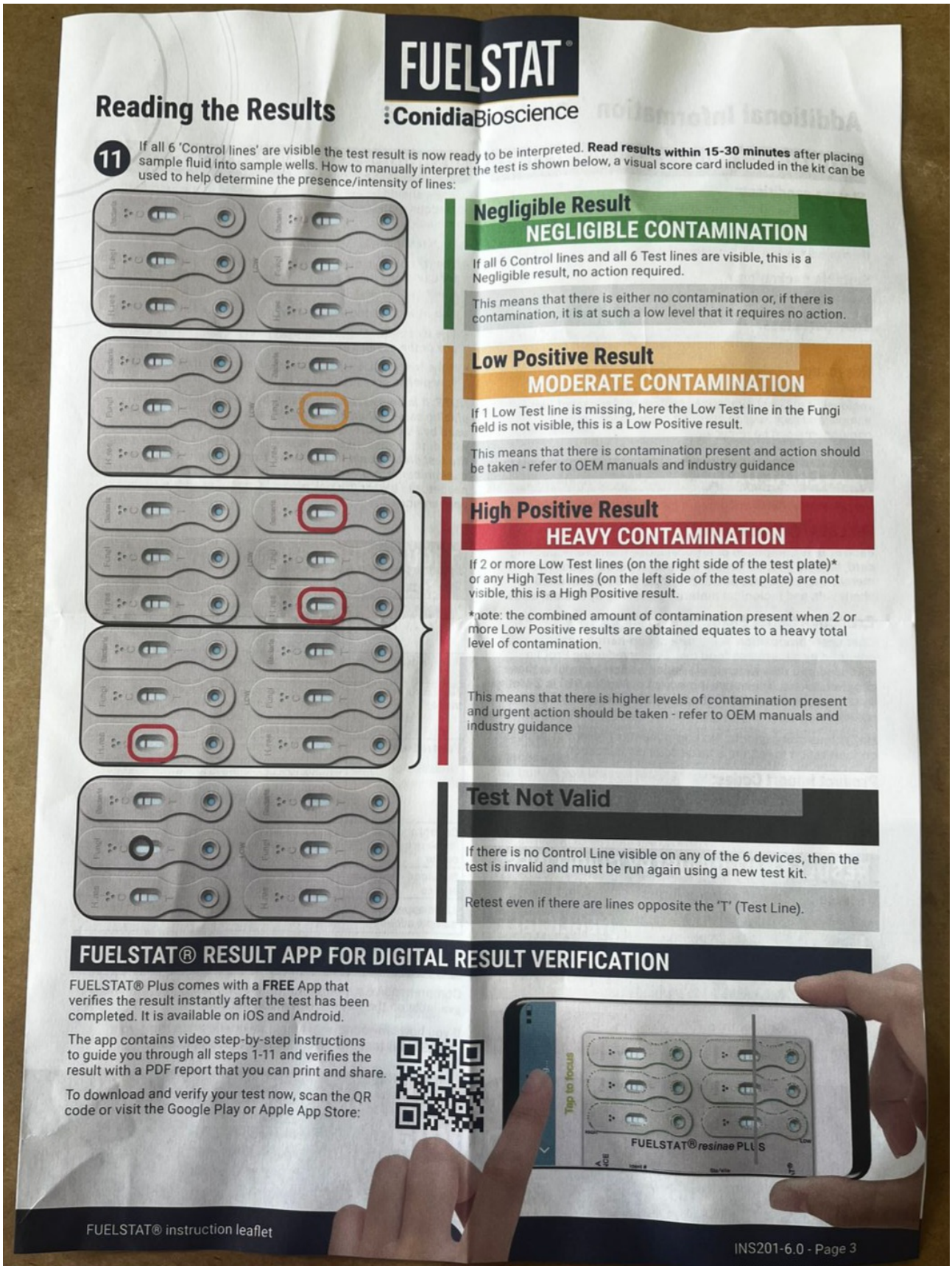


Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Passo a Passo

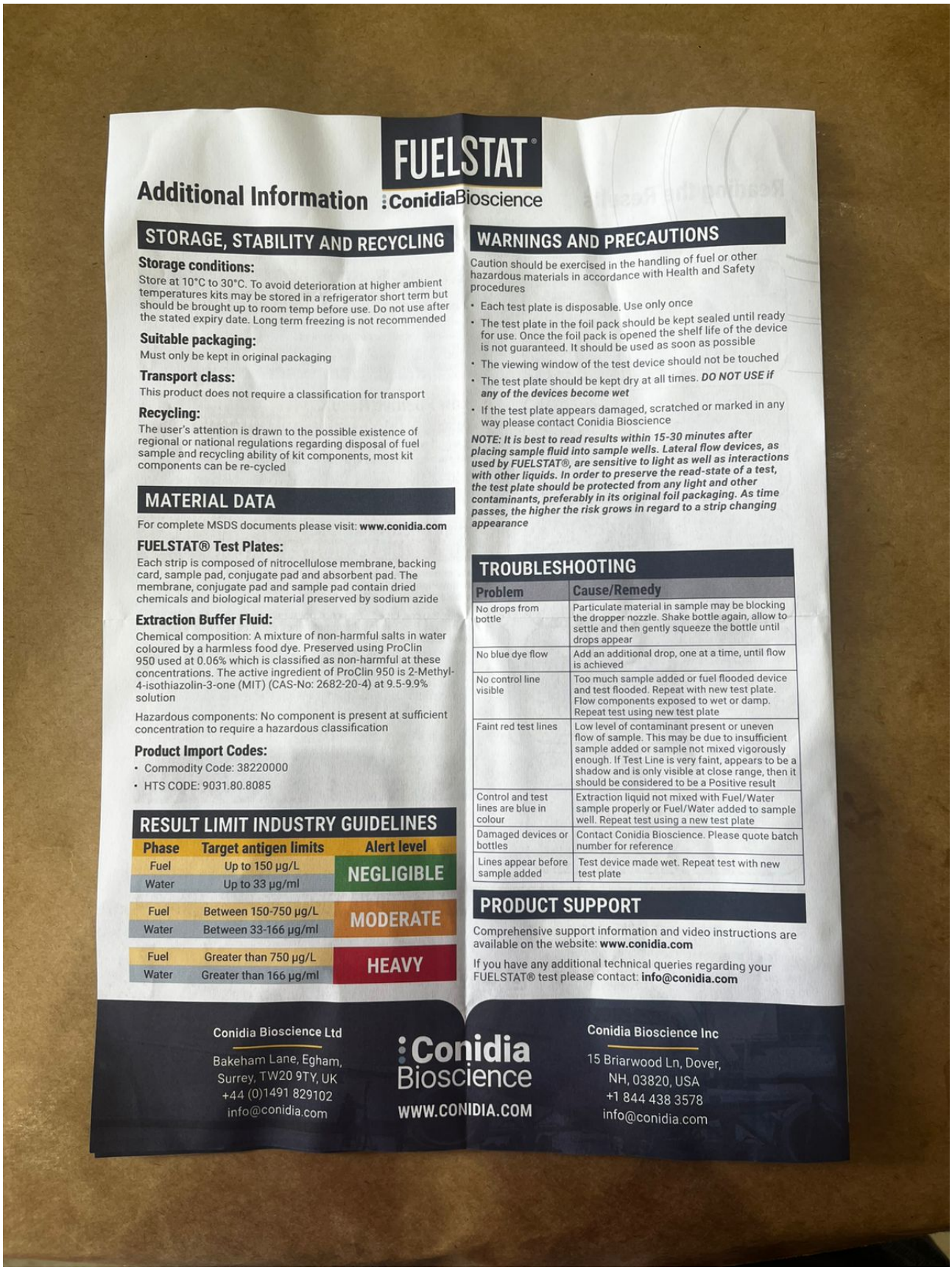
Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Leitura de resultados



Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – Manual de instruções FUELSTAT resinae Plus: Informações adicionais



FUELSTAT®

Additional Information

Conidia Bioscience

STORAGE, STABILITY AND RECYCLING

Storage conditions:
Store at 10°C to 30°C. To avoid deterioration at higher ambient temperatures kits may be stored in a refrigerator short term but should be brought up to room temp before use. Do not use after the stated expiry date. Long term freezing is not recommended

Suitable packaging:
Must only be kept in original packaging

Transport class:
This product does not require a classification for transport

Recycling:
The user's attention is drawn to the possible existence of regional or national regulations regarding disposal of fuel sample and recycling ability of kit components, most kit components can be re-cycled

MATERIAL DATA

For complete MSDS documents please visit: **www.conidia.com**

FUELSTAT® Test Plates:
Each strip is composed of nitrocellulose membrane, backing card, sample pad, conjugate pad and absorbent pad. The membrane, conjugate pad and sample pad contain dried chemicals and biological material preserved by sodium azide

Extraction Buffer Fluid:
Chemical composition: A mixture of non-harmful salts in water coloured by a harmless food dye. Preserved using ProClin 950 used at 0.06% which is classified as non-harmful at these concentrations. The active ingredient of ProClin 950 is 2-Methyl-4-isothiazolin-3-one (MIT) (CAS-No: 2682-20-4) at 9.5-9.9% solution

Hazardous components: No component is present at sufficient concentration to require a hazardous classification

Product Import Codes:
- Commodity Code: 38220000
- HTS CODE: 9031.80.8085

RESULT LIMIT INDUSTRY GUIDELINES

Phase	Target antigen limits	Alert level
Fuel	Up to 150 µg/L	NEGLIGIBLE
Water	Up to 33 µg/ml	
Fuel	Between 150-750 µg/L	MODERATE
Water	Between 33-166 µg/ml	
Fuel	Greater than 750 µg/L	HEAVY
Water	Greater than 166 µg/ml	

WARNINGS AND PRECAUTIONS

Caution should be exercised in the handling of fuel or other hazardous materials in accordance with Health and Safety procedures

- Each test plate is disposable. Use only once
- The test plate in the foil pack should be kept sealed until ready for use. Once the foil pack is opened the shelf life of the device is not guaranteed. It should be used as soon as possible
- The viewing window of the test device should not be touched
- The test plate should be kept dry at all times. ***DO NOT USE if any of the devices become wet***
- If the test plate appears damaged, scratched or marked in any way please contact Conidia Bioscience

NOTE: It is best to read results within 15-30 minutes after placing sample fluid into sample wells. Lateral flow devices, as used by FUELSTAT®, are sensitive to light as well as interactions with other liquids. In order to preserve the read-state of a test, the test plate should be protected from any light and other contaminants, preferably in its original foil packaging. As time passes, the higher the risk grows in regard to a strip changing appearance

TROUBLESHOOTING

Problem	Cause/Remedy
No drops from bottle	Particulate material in sample may be blocking the dropper nozzle. Shake bottle again, allow to settle and then gently squeeze the bottle until drops appear
No blue dye flow	Add an additional drop, one at a time, until flow is achieved
No control line visible	Too much sample added or fuel flooded device and test flooded. Repeat with new test plate. Flow components exposed to wet or damp. Repeat test using new test plate
Faint red test lines	Low level of contaminant present or uneven flow of sample. This may be due to insufficient sample added or sample not mixed vigorously enough. If Test Line is very faint, appears to be a shadow and is only visible at close range, then it should be considered to be a Positive result
Control and test lines are blue in colour	Extraction liquid not mixed with Fuel/Water sample properly or Fuel/Water added to sample well. Repeat test using a new test plate
Damaged devices or bottles	Contact Conidia Bioscience. Please quote batch number for reference
Lines appear before sample added	Test device made wet. Repeat test with new test plate

PRODUCT SUPPORT

Comprehensive support information and video instructions are available on the website: **www.conidia.com**

If you have any additional technical queries regarding your FUELSTAT® test please contact: **info@conidia.com**

Conidia Bioscience Ltd
Bakeham Lane, Egham,
Surrey, TW20 9TY, UK
+44 (0)1491 829102
info@conidia.com

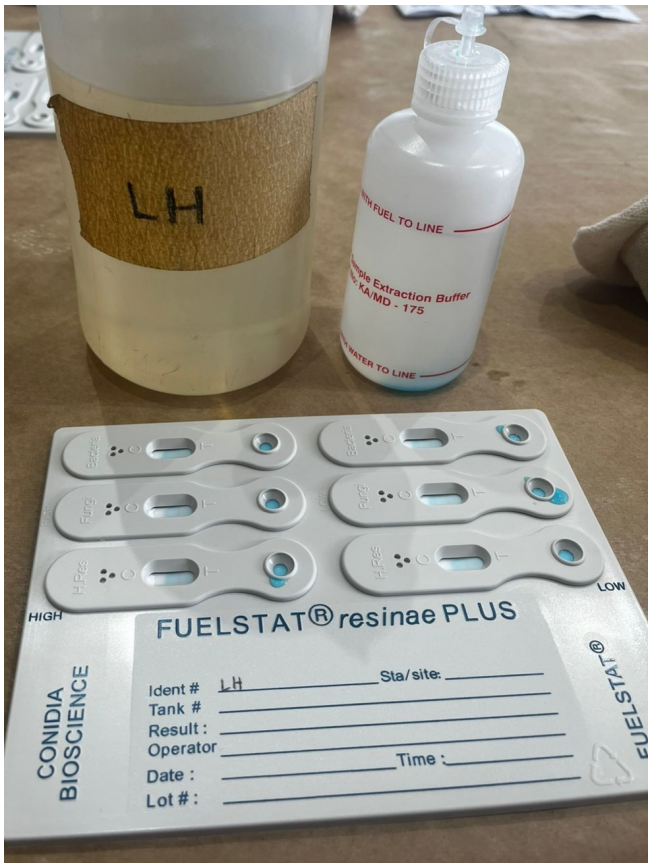
Conidia Bioscience
WWW.CONIDIA.COM

Conidia Bioscience Inc
15 Briarwood Ln, Dover,
NH, 03820, USA
+1 844 438 3578
info@conidia.com

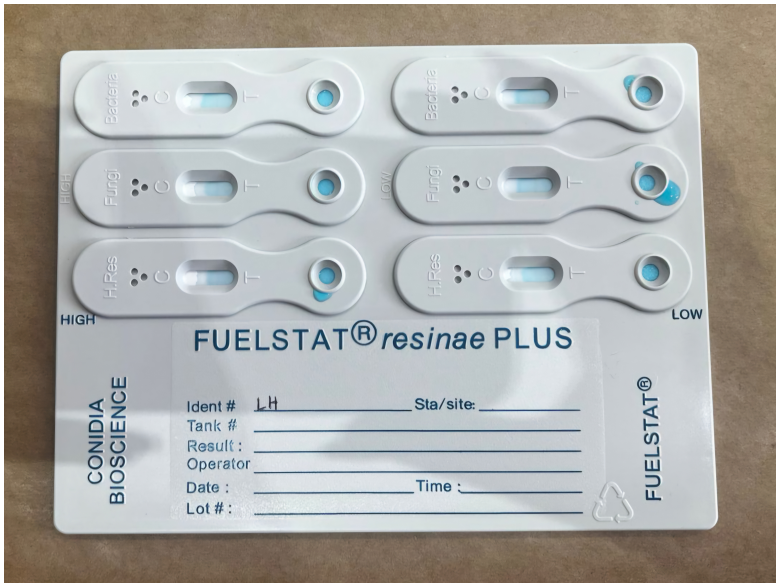
Fonte: Próprio Autor

Neste caso, o teste foi realizado extraindo amostras de seis pontos de coleta de cada asa da aeronave. A referência às asas foi feita como "LH"para "*Left Hand*"(esquerda) e "RH"para "*Right Hand*"(direita). A primeira amostra extraída e fotografada foi LH, conforme 31a. O teste limpo, antes da leitura, parece-se com o da 31b.

Figura 31 – Teste iniciado



(a) Teste da asa esquerda

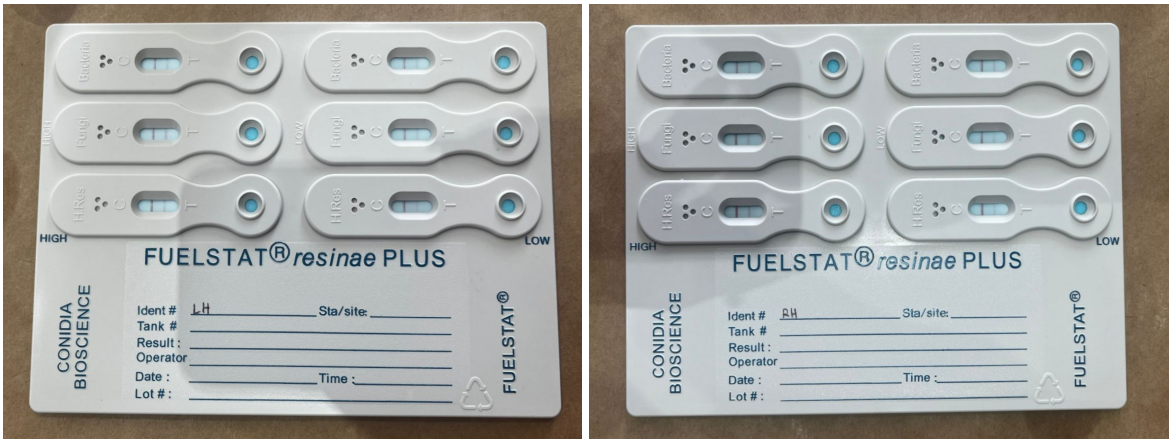


(b) Inicio do teste

Fonte: Próprio Autor

Após período de repouso estabelecido pelo manual, pode-se realizar as leituras dos resultados dos testes, que é realizada a partir da análise dos indicadores, que são "riscos"que aparecem nos visores dos testes. Cada um representará a contaminação identificada mais próxima ao ponto de coleta na asa da aeronave. Percebe-se na 32a que há contaminação moderada, devido ao segundo indicador estar esboçado mais fraco que o primeiro. Já na asa direita houve contaminação severa, uma vez que mais de um dos indicadores ficou levemente visível, confirmando a extensão da contaminação por dentro do tanque.

Figura 32 – Teste iniciado

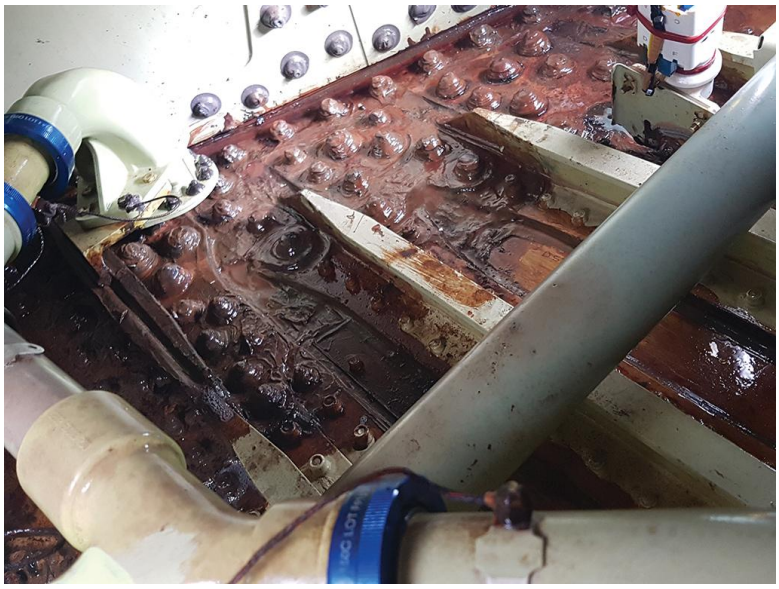


(a) Resultado da asa ESQUERDA (b) Resultado da asa DIREITA

Fonte: Próprio Autor

A proliferação se deu devido à atitude tardia após a detecção da contaminação, o que permitiu mais tempo para a multiplicação dos microrganismos no interior do tanque de combustível. A falta de manutenção nos estágios iniciais da contaminação provocou aumento da quantidade e da complexidade dos serviços necessários ao reparo e à recuperação da aeronave decorrentes do ocorrido. A manutenção corretiva, neste caso, é muito mais onerosa do que a manutenção preventiva/preditiva (SHKILNIUK, I.; SHEVCHUK, N.,).

Figura 33 – Contaminação microbiológica severa em tanque de aeronave



Fonte: (Lufthansa, 2020)

apresenta um exemplo de tanque severamente contaminado por microrganismos, formando, inclusive, A Figura 33 apresenta um exemplo de tanque severamente contaminado por microrganismos, formando, inclusive, uma massa escura e visível que cobre as superfícies do tanque. O procedimento, neste caso, para a recuperação dos tanques de combustível envolve a desmontagem da asa para destanqueamento da aeronave, processo de remoção dos tanques de combustível de maneira integral das asas, para o correto procedimento de inspeção e higienização. Depois, é necessária uma inspeção minuciosa tanto nos tanques de combustível quanto no interior da asa, para averiguar a verdadeira extensão da contaminação. Além disso, a correta higienização dos tanques já contaminados exige que eles estejam vazios; portanto, é necessária a drenagem e o descarte de todo o combustível presente na aeronave, quando for impossível recuperá-lo (SHKILNIUK, I.; SHEVCHUK, N.,).

6 PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA

O estudo dos tipos de contaminação de combustível, dos métodos de detecção aplicados e dos casos reais registrados ao longo da aviação moderna é motivado pela busca constante por níveis mais elevados de segurança operacional. A aviação é um setor em que pequenas variáveis podem gerar consequências significativas, e o combustível ocupa posição crítica nesse contexto. Dessa forma, as operações aeronáuticas dependem de práticas rigorosas de segurança associadas ao manuseio, transporte, armazenamento e uso do combustível. Ao longo de toda a cadeia logística, desde a origem até o momento em que o combustível é consumido no motor da aeronave, há pontos vulneráveis a contaminações. Essas contaminações podem ocorrer devido a falhas operacionais, lacunas em procedimentos já estabelecidos, desgaste natural do sistema ou simples exposição inevitável ao ambiente.

A etapa de recebimento constitui o primeiro ponto de contato entre o operador logístico e o combustível. Ela é fundamental para assegurar o controle adequado do produto ao longo de sua vida útil. Receber um novo lote implica aceitar a responsabilidade por sua integridade, o que só deve ocorrer após a verificação de conformidade visual, física e documental. Conforme exposto ao longo deste trabalho, existem testes específicos frequentemente aplicados nesta fase, justamente para assegurar que o produto recebido atenda aos requisitos mínimos de qualidade definidos por normas técnicas e práticas consolidadas de segurança aeronáutica.

No armazenamento, medidas semelhantes devem ser adotadas. O objetivo é confirmar a qualidade do combustível no momento do recebimento e monitorar sua condição enquanto permanece estocado, visto que há fatores degradantes neste período. A contaminação pode ocorrer mesmo quando o combustível é inicialmente aprovado, pois pode se manifestar depois. Isso ocorre porque fatores como umidade, temperatura ambiente, oxidação, contato com superfícies inadequadas ou mesmo longos períodos de inatividade favorecem alterações físico-químicas do produto. Assim, boas práticas de armazenamento alinham-se diretamente à preservação da qualidade do combustível, o que implica que falhas neste estágio poderão se propagar posteriormente durante o abastecimento da aeronave.

A partir desses princípios, foi elaborada uma síntese (disposta logo a seguir, entre as seções 6.1 e 6.7) das principais boas práticas de segurança observadas pelos autores referenciados neste trabalho, refletindo também exigências normativas e lições aprendidas a partir de estudos de caso previamente analisados. Essas medidas visam garantir que o controle de qualidade seja mantido em todas as fases de manipulação do combustível e que a segurança da operação seja preservada continuamente.

6.1 IDENTIFICAÇÃO

Cada tambor de combustível recebido deve ser identificado no momento da chegada, registrando-se, na tampa, o tipo de combustível e a data de recebimento. Além de ser uma medida simples, essa prática desempenha um papel essencial na gestão logística, permitindo rastrear a origem do lote, as condições de armazenamento e a ordem de consumo ao longo do tempo. A falta de identificação pode resultar em confusão entre diferentes tipos de combustíveis, perda de validade operacional do produto ou falhas

na aplicação adequada das metodologias de controle de qualidade. Dessa forma, a identificação atua como o primeiro elemento formal de organização do ciclo de vida do combustível, assegurando que ele permaneça em uma cadeia controlada e rastreável (Rabelo, 2025).

6.2 TEMPO DE ARMAZENAMENTO

O período de armazenamento recomendado é de 12 meses a partir do envase. Após esse prazo, alterações podem ocorrer no combustível, incluindo oxidação, aumento no teor de água e mudanças em suas propriedades físico-químicas originais. O controle temporal do armazenamento tem como objetivo evitar que o combustível permaneça inativo por períodos prolongados, pois o tempo é um agente natural de degradação. Assim, a adoção do princípio FIFO assegura que o combustível mais antigo seja utilizado primeiro, reduzindo o risco de degradação por tempo prolongado. Esse controle também simplifica os ciclos de inspeção e de planejamento de reabastecimento, aumentando a previsibilidade operacional (Rabelo, 2025).

6.3 INSPEÇÕES PERIÓDICAS

As inspeções periódicas consistem em avaliações visuais do estado físico dos recipientes de armazenamento, incluindo a verificação de vazamentos, corrosão, deformações estruturais e falhas de vedação. Embora simples, esta etapa é decisiva para impedir que danos físicos ao recipiente avancem a ponto de comprometer o combustível armazenado. A inspeção também permite identificar indícios de contaminação externa, como acúmulo de água no entorno ou evidências de manuseio inadequado. A consistência dessa prática reduz incertezas e reforça uma postura preventiva, evitando que falhas estruturais evoluam para contaminações expressivas ou desperdício (Rabelo, 2025).

6.4 DRENAGEM FREQUENTE

A drenagem periódica é fundamental para remover a água acumulada no fundo dos tambores e tanques, impedindo que ela atinja o sistema de abastecimento. Devido à diferença de densidade, a água se deposita na parte inferior removida; pode ser transferida com o combustível durante o abastecimento da aeronave. Essa prática reduz não apenas o risco de falha operacional decorrente de água no sistema de combustível, mas também a possibilidade de proliferação microbiológica, já que diversos microrganismos utilizam a água como meio de desenvolvimento (Rauch *et al.*, 2006).

6.5 LAVAGEM PERIÓDICA DOS TANQUES

A lavagem dos tanques deve seguir procedimentos padronizados, utilizando apenas materiais compatíveis com os sistemas de combustível aeronáutico para evitar a geração de resíduos adicionais. A limpeza permite remover depósitos microbiológicos e resíduos sólidos acumulados durante o uso, eliminando potenciais fontes de contaminação futura. Essa prática tem relevância especialmente em sistemas com histórico de formação microbiana ou em operações em que o combustível permanece em armazenamento por longos períodos (Rauch *et al.*, 2006).

6.6 TESTES E ENSAIOS

A realização sistemática de testes em diferentes fases da cadeia logística é necessária para garantir monitoramento contínuo das condições do combustível. Como discutido neste trabalho, os métodos aplicados podem ser visuais, físico-químicos ou microbiológicos, dependendo do objetivo, do tipo de operação e da etapa em que são empregados. A repetição de ensaios não é redundante, mas estratégica, pois contaminações podem surgir ao longo do trajeto entre o fabricante, a armazenagem, a distribuição e o consumo.

6.7 REGISTRO E DOCUMENTAÇÃO

O registro adequado de todas as inspeções, drenagens, resultados de testes e movimentações assegura a rastreabilidade e permite a análise histórica do comportamento do combustível. Esses registros facilitam a identificação de tendências e a prevenção de falhas, além de servir de referência para futuras auditorias, treinamentos e investigações técnicas relacionadas a incidentes ou inconsistências operacionais.

A aplicação consistente dessas boas práticas contribui diretamente para o aumento da segurança operacional, reduzindo riscos e fortalecendo a confiabilidade do combustível utilizado nas aeronaves ao longo de todas as etapas da operação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação de combustível aeronáutico representa um risco real e relevante para a segurança operacional, independentemente do tipo de aeronave, do combustível utilizado, do ambiente de operação ou dos integrantes da cadeia de abastecimento. Ao longo deste trabalho, foram analisados os principais tipos de contaminantes presentes em combustíveis aeronáuticos, suas origens e efeitos, bem como os métodos empregados para a detecção, o controle, a remediação e a prevenção. Ficou evidente que os mecanismos de contaminação podem se manifestar tanto por fatores externos, como a infiltração de água ou de partículas sólidas, quanto por fatores internos, como a formação de colônias microbianas ou de emulsões associadas ao uso de surfactantes. Esses contaminantes alteram as características físico-químicas do combustível e podem afetar diretamente o desempenho de motores, estruturas, sistemas e componentes envolvidos, desde o armazenamento do combustível até seu uso efetivo.

Os métodos de detecção e análise apresentados demonstraram sua importância no controle preventivo, especialmente em ambientes operacionais complexos e de difícil acesso, tanto de mão de obra especializada quanto de infraestrutura. Testes como *Shell Water Detector*, Millipore, *Microb Monitor Test Kit*, análise visual e procedimentos de densidade e temperatura compõem um conjunto de ferramentas essenciais para identificar a presença de contaminantes antes que evoluam para condições críticas. Esses testes não devem ser tratados apenas como exigências normativas, mas como parte do ciclo contínuo de garantia da qualidade do combustível, pois integram as rotinas de manutenção e operação.

Os estudos de caso abordados reforçam a compreensão da importância do cuidado com o combustível. O acidente com o Boeing 777 da British Airways exemplificou como pequenas quantidades de água presentes no combustível, mesmo dentro dos parâmetros aceitos, podem resultar em falhas severas quando associadas a condições específicas, como a operação de voos longos sob baixas temperaturas e a componentes cuja geometria favoreceu a formação de gelo. Da mesma forma, o estudo realizado por Michelle E. Rauch evidenciou que mesmo os ambientes militares operacionais podem apresentar características que favorecem o desenvolvimento microbiano, especialmente quando há água livre ou condições inadequadas de drenagem e de limpeza dos tanques.

Dessa forma, as medidas preventivas discutidas ao longo do trabalho mostram-se indispensáveis para minimizar e controlar os riscos associados à contaminação do combustível. A correta manipulação e logística deste combustível se dão por procedimentos como rastreabilidade do recebimento, controle da vida útil, drenagem periódica, inspeções regulares, monitoramento microbiológico, realização de testes antes do abastecimento e cuidados durante o manuseio. Esses procedimentos contribuem para reduzir falhas que, quando acumuladas ou proliferadas, podem comprometer a manutenção da aeronave, o desempenho dos motores e a segurança do voo como um todo.

Em suma, a contaminação de combustível aeronáutico não deve ser tratada como um evento casual, mas sim como um fenômeno previsível que exige monitoramento contínuo e práticas operacionais consistentes. A análise apresentada neste trabalho demonstra que a prevenção é a maneira mais eficaz de evitar a evolução de pequenos problemas em falhas operacionais graves. Portanto, a continuidade

dos estudos, a implementação de rotinas de inspeção, o aprimoramento das práticas já existentes e o treinamento de operadores são essenciais para fortalecer a segurança das operações aeronáuticas e reduzir significativamente as ocorrências associadas à contaminação de combustível.

8 SUGESTÕES DE NOVOS ESTUDOS

Finalmente, é possível perceber e sugerir opções de continuidade de estudo para este trabalho, a fim de fomentar a pesquisa acadêmica sobre o tema e a discussão sobre a contaminação de combustível em aeronaves. Dando continuidade aos estudos sobre contaminação de combustível, especificamente ao monitoramento da saúde do sistema em aeronaves, a sugestão de pesquisa e desenvolvimento gira em torno do aprofundamento de sistemas de monitoramento.

Grandes fabricantes aeronáuticos utilizam sistemas de monitoramento de saúde e status de combustível, linhas e sistemas, muitas vezes embarcados (para acompanhamento em tempo real) e disponíveis com infraestrutura em solo, para comunicação direta com centros de serviço e de gerenciamento de manutenção. A Boeing, por exemplo, conta com um sistema de *Aircraft Health Management* (AHM) integrado ao seu Boeing AnalytX. A Airbus tem um sistema semelhante, o *Aircraft Conditions Monitoring System* (ACMS). A EMBRAER denomina o seu como *Aircraft Health Analysis and Diagnosis* (AHEAD). Todos são sistemas de monitoramento de saúde que facilitam a operação, a identificação e a caracterização de problemas e a melhor organização da manutenção.

O M'ARMS, *Modular Aircraft Recording Monitoring System*, é um sistema integrado de registro e monitoramento desenvolvido com o objetivo de apoiar a operação e a manutenção de aeronaves por meio da coleta, organização e análise de dados de voo e de condição dos sistemas. O sistema foi concebido para atender aos requisitos regulatórios relacionados a parâmetros de dados de voo, automatizar o registro e a análise das missões, fornecer suporte direto à manutenção por meio de relatórios e diagnósticos e permitir a identificação de degradações em componentes mecânicos considerados críticos. Trata-se de uma arquitetura modular que integra diferentes funções em um único sistema embarcado e em sua infraestrutura em solo (EUROCOPTER, 2025).

Em sua arquitetura há três conceitos principais. O CVFDR, *Combined Voice and Flight Data Recorder*, tem como finalidade o registro contínuo de dados históricos de voo, incluindo parâmetros obrigatórios e recomendados, permitindo sua utilização em investigações e análises técnicas. O UMS, *Usage Monitoring System*, está associado ao monitoramento do uso da aeronave em voo, acompanhando as condições operacionais em cada missão e integrando o histórico de horas e ciclos necessários ao planejamento e à execução das atividades de manutenção. Já o HUMS, *Health and Usage Monitoring System*, é voltado ao monitoramento da condição dos sistemas, utilizando indicadores de saúde extraídos de espectros de vibração, de modo a permitir a identificação de degradações de desempenho e o acompanhamento de tendências mecânicas ao longo do tempo (United States of America, 2009). De maneira integrada, esses três conceitos compõem o M'ARMS, que se organiza em um segmento embarcado de aquisição de dados, um segmento em solo responsável pelo tratamento, análise e gestão histórica das informações, e um meio físico de armazenamento e transferência dos dados coletados após cada sessão de voo (EUROCOPTER, 2025).

Uma possibilidade de continuidade de estudo envolve o sistema M'ARMS, com foco na análise histórica e na gestão de dados de manutenção relacionados ao combustível aeronáutico. Trabalhos futuros podem aprofundar o uso do M'ARMS como ferramenta de prevenção, investigando como o

cruzamento de registros de testes de qualidade, drenagens, inspeções de tanques, limpezas corretivas e eventos de contaminação pode contribuir para a identificação de padrões recorrentes e falhas latentes na cadeia de abastecimento. Esta sugestão é feita baseada na proximidade deste campus UNESP com agentes de integração do Exército Brasileiro, que já favoreceram outros trabalhos em outros momentos (Silva, 2024), e seguramente abraçariam esta nova linha de estudo. Essa linha de pesquisa permitiria avaliar o papel do M'ARMS no fortalecimento da rastreabilidade, na antecipação de riscos e na tomada de decisão na manutenção preventiva, consolidando uma abordagem baseada em dados para mitigar os efeitos da contaminação de combustível ao longo da vida operacional da aeronave (United States of America, 2010).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 43 – Manutenção, Manutenção Preventiva, Reconstrução e Alteração de Produtos Aeronáuticos**. 2021. Emenda nº 05. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-43/@@display-file/arquivo_norma/RBAC43EMD05%20ajustado.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Especificações do QAV-1**. 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/>. Acesso em: 11 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Ponto de Fulgor – Especificações Técnicas**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos/1607120-especificacoes-nacionais-do-biodiesel-b100.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Especificações do AVGAS**. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/>. Acesso em: 4 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Tabela de Especificações do Combustível Jet-A1 (Resolução ANP nº 894/2022)**. 2022. Resolução nº 894, de 2022. Acesso em: 22 out. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/arquivos/res-894-2022-01.pdf>.

ALMEIDA, Tiago Andre De. **Gulfstream**. 2024. Disponível em: <https://www.jetphotos.com/photo/11433204>. Acesso em: 25 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. **Aviação do Exército**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.eb.mil.br/o-exercito/armas-quadros-e-servicos/aviacao>. Acesso em: 1 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. Força Aérea Brasileira. **Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA)**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/o-cenipa>. Acesso em: 14 nov. 2025.

EUROCOPTER. **M'ARMS (Modular Aircraft Recording and Monitoring System) – EC225 and EC275**. França, 2025.

IPU Group. **Water Contamination in Diesel**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.ipu.co.uk/diesel-contamination/water-contamination/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Lufthansa. **Harmful biofilm buildup was found within a wing tank being inspected at Lufthansa Technik. Tanks previously infected are more likely to have a follow-up spread of microbial load. Credit: Lufthansa Technik**. 2020. Disponível em: <https://aviationweek.com/mro/microbial-mitigation-matters-more-fleets-remain-idle>. Acesso em: 25 nov. 2025.

MILLIPORE. **Millipore Fuel Analysis and Filtration Products**. Alemanha, 2025. Disponível em: <https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/life-science/millipore>. Acesso em: 24 nov. 2025.

RABELO, Moisés. **Notas de Aula – Contaminação Microbiológica do Combustível: Testes e Análises**. 2025. Escola Municipal de Ciências Aeronáuticas de Taubaté. Brasil, 2025.

RAUCH, M. E. *et al.* Characterization of microbial contamination in united states air force aviation fuel tanks. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, Oxford University Press, v. 33, n. 1, p. 29–36, 2006.

ROGERS, J.; KRYNITSKY, J.; CHURCHILL, A. Jet fuel contamination: water, surfactants, dirt and microbes. **SAE Transactions**, JSTOR, p. 281–292, 1963.

SHELL. **Shell Water Detector**. Netherlands, 2025. Ferramenta de detecção de água em combustíveis aeronáuticos. Disponível em: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/shells-water-detector-tool.html>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SHKILNIUK, I.; SHEVCHUK, N. Monitoring the risks of microbiological contamination of aviation fuels and fuel systems. *In*: BOICHENKO, S. et al. (ed.). **Modern Technologies in Energy and Transport**. [S.l.]: Springer, 2023. p. 235-248.

SILVA, M. F. P. **Balanceamento dinâmico e aerodinâmico de rotores em helicópteros: estudo de caso aplicado a aeronave real**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/259163>.

UNITED KINGDOM. Department for Transport. Air Accidents Investigation Branch. **Aircraft Accident Report No. 1/2010: Boeing 777-236ER, G-YMMM**. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5422f3dbe5274a1314000495/1-2010_G-YMMM.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2025.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of the Air Force. United States Air Force. **Discovering What Is Bugging Military Aircraft**. 2024. Disponível em: <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/939659/afrl-discovering-whats-bugging-military-aircraft/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of the Air Force. United States Army Aviation and Missile Command. **Maintenance and Analysis Reporting and Monitoring System (M'ARMS): Program Overview and User Guidance**. [S.l.], 2010. Documento institucional sobre coleta e análise de dados de manutenção.

UNITED STATES OF AMERICA, Department of Transportation, Federal Aviation Administration. **Advisory Circular AC 27-1B: Certification of Normal Category Rotorcraft**. 2009. Seções relacionadas a Health and Usage Monitoring Systems (HUMS). Disponível em: <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_27-1B.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2025.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Advisory Circular No. 33.67-1: Turbine Fuel Lubricity**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_33.67-1.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2025.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. **Title 14 Code of Federal Regulations Part 43 – Maintenance, Preventive Maintenance, Rebuilding, and Alteration**. [S.l.], 2025. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/part-43>. Acesso em: 27 nov. 2025.