



FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES E A SEGURANÇA DE VOO: UMA ANÁLISE DE EVENTOS DE *LOC-I* NA AVIAÇÃO BRASILEIRA

João Miguel de Lucca ¹, André Luís Boff ¹
1. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Endereços de e-mail dos autores correspondentes: j.miguel@edu.pucrs.br; andre.boff@pucrs.br

PAPER ID: SITXXX

RESUMO

Este estudo busca analisar eventos de perda de controle em voo (*LOC-I*) na aviação brasileira causados pela formação de gelo em voo, buscando elucidar suas causas, contextos operacionais e falhas sistêmicas, a partir da análise de relatórios oficiais. Este estudo utilizou-se de uma abordagem qualitativa, exploratória, com delineamento bibliográfico e documental. Os dados foram extraídos de uma busca na base de dados dos relatórios finais do CENIPA, chegando-se a um contexto de análise de dois eventos distintos. O trabalho pretendeu preencher uma lacuna na literatura nacional ao associar eventos de *LOC-I* como resultado da situação de formação de gelo em voo, relação esta pouco presente, conforme buscas realizadas nas bases de dados sobre eventos aeronáuticos. A relevância acadêmica reside na interseção entre a meteorologia aeronáutica e a segurança operacional. A análise revelou que em ambos os casos houve falhas na utilização dos sistemas que combatem a formação de gelo em voo, percepção deficiente da situação de formação de gelo nas aeronaves por parte das tripulações, e descumprimento de procedimentos operacionais que culminaram na perda de controle em voo. O estudo contribuiu com o aprimoramento do entendimento sobre os resultados e riscos associados a formação de gelo em voo, propondo a necessidade da identificação e reconhecimento de áreas de ocorrência de formação de gelo. Destacou ainda melhorias como a necessidade de mudanças nos treinamentos e melhorias nos programas de treinamentos de tripulantes e revisões que destaquem o risco das operações em áreas de meteorologia adversa para a mitigação de situações de *LOC-I* induzidas pela formação de gelo.

Palavras-chave: formação de gelo em voo; perda de controle em voo; *LOC-I*.

GENERATIVE AI USAGE STATEMENT

The authors declare that the use of generative AI tools was restricted to technical support activities, without compromising the originality, analysis, and conclusions presented in the work. All information obtained through these resources was carefully evaluated and integrated into the study, ensuring methodological rigor and academic integrity.

1 INTRODUÇÃO

A formação de gelo em aeronaves é uma das situações, afetas ao seu ambiente operacional, mais críticas para a aviação. Define-se como àquela situação em que o gelo se forma e adere nas superfícies da aeronave. A sua principal causa acontece quando se encontra com água super-resfriada na atmosfera em que se realiza o voo. Normalmente, estas gotas de água super-resfriadas estão presentes dentro de nuvens onde a temperatura varia de +2°C a -20°C, podendo chegar a -40°C (Wu, 2018). O encontro deste elemento, nestas condições, com as superfícies da aeronave, gera a formação de gelo, podendo vir a afetar a aerodinâmica do voo como um todo (com possível perda de sustentação

da aeronave), e mais especificamente a efetividade dos comandos de voo (ailerons, estabilizador horizontal, leme de direção e estabilizadores) (Cober, Isaac, Strapp, 2001; Lynch, Khodadoust, 2002).

Para mitigar este tipo de situação, as aeronaves normalmente possuem sistemas que combatem a formação deste gelo acumulado em voo. Estes sistemas são denominados *de-ice* e *anti-ice*, e normalmente são responsáveis pela prevenção/extinção do gelo acumulado em áreas mais críticas da aeronave, como bordos de ataque, entradas de ar e receptores de dados da atmosfera (ATR, 2011; González, 2017). Contudo, o gelo pode se acumular em regiões que não possuem qualquer tipo de proteção, ou mesmo em áreas protegidas, em que existe um certo atraso na ativação do sistema correspondente. Nestas situações existe uma probabilidade maior de ocorrer uma perda de controle em voo, devido à diminuição do vetor sustentação, através do aumento exponencial do arrasto provocado pelo acréscimo de gelo (Cober, Isaac, Strapp, 2001; Lynch, Khodadoust, 2002).

A perda do controle de voo, e sua consequente capacidade de manobrabilidade, intitula-se de *LOC-I (Loss of Control In-flight)*, definida como àquela situação em que a tripulação não consegue manter o controle pretendido da aeronave, resultando em um desvio irrecuperável da trajetória de voo (IATA, 2015). Quando associada a formação de gelo, resulta em uma situação em que os comandos se tornam ineficientes para comandar as superfícies de voo e manter a aeronave na situação de voo pretendida, seja pelo possível travamento das superfícies devido ao acúmulo de gelo, ou seja pelo próprio aumento do peso total da aeronave (Politovich, 2015).

O histórico de ocorrências aeronáuticas¹ que atribuem como fatores contribuintes o gelo excessivo em voo, ou a perda do controle durante a operação aérea, são bastante numerosos dentro da indústria aeronáutica. Contudo, pouca informação aparece da decorrência do primeiro (gelo) gerando o segundo (LOC-I). Este estudo pretende fazer um levantamento deste tipo de evento dentro do cenário brasileiro, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA, apresentando as similaridades e diferenças encontradas sobre as ocorrências analisadas.

2 O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES

A formação de gelo é um fenômeno crítico em que água super-resfriada, conhecida também por gotas super-resfriadas, estará no formato de chuva congelante, chuvisco congelante e/ou grandes gotas super-resfriadas. Todas ocorrem quando entram em contato com as superfícies da aeronave, congelando-se e gerando um respectivo depósito de gelo (Cober, Isaac, Strapp, 2001). Fatores meteorológicos como temperatura externa do ar, umidade, presença de nebulosidade e a existência e tamanho de gotas de água super-resfriadas são fatores importantes para a determinação da probabilidade da formação de gelo e sua severidade (Morcrette, 2019).

Neste sentido, existem duas condições para a formação de gotas super-resfriadas: a primeira é quando um hidrometeoro congelado passa por uma região de temperaturas congelantes para outra região com temperaturas sub-congelantes, adotando a condição de líquido novamente e passando por um processo de superfusão (Sánchez, 2014). A segunda condição é quando partículas de água detidas dentro de uma nuvem pelo processo de condensação, crescem por um ciclo de colisão-coalescência. Normalmente o topo de nuvens convectivas servem de origem para que tais gotas cresçam por este processo, o qual apenas é concretizado quando a velocidade da gota vence a força convectiva da nuvem (Cober, 1996). O primeiro mecanismo é normalmente associado com regiões em que ocorrem passagens frontais (Carrière. et al. 2000). Sobre a chuva congelante:

A faixa de temperatura de ocorrência da chuva congelante é bastante pequena, uma vez que as gotas de chuva congelam e se transformam em granizo em temperaturas poucos graus abaixo de zero. [...] Sabe-se que a chuva congelante geralmente consiste em precipitação leve e uniforme em uma área bastante grande (Lewis, 1951).

¹ Qualquer evento envolvendo aeronave classificado como acidente aeronáutico, incidente aeronáutico grave, incidente aeronáutico ou ocorrência de solo, permitindo ao SIPAER a adoção dos procedimentos pertinentes (CENIPA, 2017).

Já o chuvisco congelante é a condição que mais traz perigo para a aviação. Quando comparado com a chuva congelante: há a possibilidade de o chuvisco ser encontrado em uma maior variedade de temperaturas, situações meteorológicas e altitudes (Lewis, 1951). Este fenômeno possui uma taxa maior de colisão com as superfícies da aeronave, causando um maior depósito de gelo quando comparado com outros tipos de gotas super-resfriadas. Quando uma aeronave voa em uma região em que existe a ocorrência de chuvisco congelante, ele é capaz de escorrer e se depositar em forma de gelo no intradorso e extradorso da asa. A aeronave passa a ter, então, uma maior redução de performance, quando comparada a uma situação de chuva congelante (Cober, 1996). Quanto à região de formação de grandes gotas super-resfriadas, o seguinte estudo descreve os efeitos pouco significativos deste formato:

A maioria dos voos de pesquisa foram direcionados para ou em direção a regiões frontais quentes ou de baixa pressão associadas a tempestades sinóticas de inverno em latitudes médias. As nuvens observadas eram estratiformes por natureza, sem convecção. A maioria das nuvens associadas com ambientes em que ocorriam grandes gotas super-resfriadas estavam em altitudes inferiores a 3 km, embora oito casos em distâncias superiores a 3 km e um caso a 6 km foram observados (Cober, Isaac, Strapp, 2001).

2.1 TIPOS DE GELO

Os tipos de gelo que são formados nas superfícies das aeronaves são definidos em cinco tipos: geada, geada glaceada, gelo claro, gelo escarcha ou opaco e gelo misto. Sobre os dois primeiros citados, também conhecidas por *hoar frost* e *glaze*, ambos podem se formar na aeronave tanto em solo como em voo. O *hoar frost* não apresenta efeitos significativos para a operação aérea, tampouco afeta perigosamente a aerodinâmica da aeronave, por isso não será considerado nesta análise. Por outro lado, a geada glaceada (*glaze*) pode afetar significativamente a operação aérea, porém, este tipo de gelo afeta a aeronave da mesma forma que o gelo claro, a única diferença entre ambos é o seu processo de formação, que se resume (*glaze*) a um processo de condensação de um chuvisco ou gota de chuva (ATR, 2011).

O gelo claro é considerado a forma mais perigosa de formação de gelo para a aviação. Normalmente se forma em temperaturas relativamente mais quentes, com a presença de gotas super-resfriadas maiores, alta umidade e normalmente em altas velocidades. Por conta destas condições é conhecido que o gelo claro não se forma logo quando entra em contato com a aeronave, pois a gota super-resfriada possui energia para continuar escorrendo na superfície da aeronave e, com isso, acaba se formando com mais uniformidade e de forma mais compacta, diminuindo as bolsas de ar dentro da formação. Ele também apresenta formatos específicos, se a exposição ocorrer por tempo suficiente, quando em bordos de ataque e aerofólios. Esta condição impacta mais significativamente o escoamento do fluxo de ar durante o voo (Vukits, 2002; Wu, 2018).

Já o gelo escarcha ou opaco é formado a partir do contato da aeronave com pequenas gotas super-resfriadas, normalmente em temperaturas negativas, quando voando em baixas velocidades, com baixa incidência de água ou chuva, ou com apenas o líquido das gotas super-resfriadas presentes nesta atmosfera. Este gelo se forma quando estas pequenas gotas entram em contato com a superfície da aeronave e congelam instantaneamente. A aeronave normalmente está mais fria que a atmosfera e por isso estas gotas se congelam rapidamente mantendo seu formato original, existindo a incidência de pequenas bolhas de ar dentre este tipo de formação (Wu, 2018).

Por sua vez, o gelo misto é caracterizado pela presença dos dois tipos de gelo mencionados anteriormente, o gelo claro e o gelo opaco, podendo ser considerado o mais comum de se formar nas aeronaves em voo em regiões favoráveis à formação de gelo (ATR, 2011; Vukits, 2002). Isto acontece, porque as nuvens e regiões que favorecem a formação de gelo em aeronaves possuem características mistas – como por exemplo diferentes temperaturas (normalmente entre -10°C e -20°C), e por isso a existência de gotas de água super-resfriada com tamanhos diferentes (Wu, 2018).

2.2 SISTEMAS DE ANTI-GELO E DE-GELO DAS AERONAVES

Estes sistemas são projetados para garantir a segurança das operações aéreas, prevenindo ou removendo a formação de gelo nas superfícies críticas das aeronaves e permitindo que as aeronaves voem em regiões de formação de gelo de forma segura. Essas tecnologias são essenciais para mitigar os efeitos adversos que o gelo causa na performance, aerodinâmica, estabilidade e controle de voo (AOPA, 2004; Da Silva, Silveiras, Zerbini, 2003).

O sistema de de-gelo (ou *de-ice*, em inglês) atua de forma cíclica utilizando o sistema pneumático, com a finalidade de remover o gelo que se formou na aeronave (normalmente este sistema equipa os bordos de ataque da aeronave) inflando os boots e quebrando o gelo formado; quando o sistema está desligado ou não inflado, permite que o gelo se forme nos bordos de ataque e regiões que possuem o sistema. Embora esses sistemas possam remover o gelo eficientemente, o gelo que ocorre e congela em superfícies não protegidas adjacentes pode criar maiores perigos, como os chamados "*ridges*" de gelo, que podem aumentar significativamente o arrasto e diminuir a sustentação, normalmente são resultantes da formação de gelo com a presença de grandes gotas super-resfriadas (AOPA, 2004; Lynch, Khodadoust, 2002; Da Silva, Silveiras, Zerbini, 2003).

Por outro lado, o sistema de anti-gelo (ou *anti-ice* em inglês) atua de forma diferente quando comparado com o sistema de de-gelo. O sistema de anti-gelo atua de forma preventiva, ou seja, é acionado para que não haja a formação de gelo no local onde o sistema está atuando (normalmente nos bordos de ataque dos aerofólios, bocais do motor e instrumentos como tubo de pitot) e funciona de forma contínua desde o momento em que é acionado em condições de formação de gelo. As aeronaves que normalmente possuem este sistema são aeronaves de grande porte ou aeronaves a jato, normalmente o sistema atua utilizando o ar quente proveniente dos motores pelo sistema de *bleed air* para aquecer as superfícies que possuem o sistema. Ainda, importa referir que outra variante do sistema de anti-gelo é conhecida como sistema anti-gelo eletrotérmico, esta variante utiliza a eletricidade como fonte de aquecimento, via resistências e indutores de calor (AOPA, 2004; Da Silva, Silveiras, Zerbini, 2003).

Pesquisas mais recentes sobre a adesão de gelo nas superfícies das aeronaves têm mostrado que fatores como temperatura ambiente, tempo de congelamento, rugosidade da superfície, quantidade de água presente na atmosfera e o ângulo de incidência das gotas super-resfriadas influenciam a força de adesão do gelo (Xue et. al, 2022). Nisso, essas tecnologias e suas limitações destacam a necessidade contínua de aperfeiçoar tanto o sistema de anti-ice quanto o de de-ice, especialmente para enfrentar os desafios impostos por condições extremas, como gelo de grandes gotas super-resfriadas, que pode comprometer severamente a segurança de voo (Lynch, Khodadoust, 2002).

3 O EVENTO *LOC-I* (*LOSS OF CONTROL IN-FLIGHT*)

A Perda de Controle em Voo (*LOC-I*) é considerada uma das situações mais letais que podem ocorrer na aviação, representando uma fração significativa das fatalidades ocorridas nos últimos dez anos – próximo dos 70%, em nível mundial. Em números mais precisos, este evento ocasionou 1.242 fatalidades, sobre um total de 2,541 fatalidades, no período de 2010 a 2014. Como definição, *LOC-I* é aquela situação em que a tripulação não consegue manter o controle pretendido da aeronave de forma satisfatória, resultando em um desvio irreversível da trajetória de voo (Boeing, 2025; IATA, 2015).

Diferente de outras categorias de ocorrências aeronáuticas, como o CFIT (*Controlled Flight Into Terrain*), que sempre foram significativos durante a fase da aproximação e pouso (Boeing, 2025), mas que sofreram redução em seus índices com o advento de sistemas como o GPWS; os acidentes resultantes de *LOC-I* tem constantemente crescido, e tem ocorrido em praticamente todas as fases do voo, caracterizando-se, principalmente, pela incapacidade da tripulação ou dos sistemas automatizados de controlarem a trajetória pretendida da aeronave (Lambregts et. al., 2008).

Normalmente, a situação de *LOC-I* resulta de outras situações presentes, como voo em velocidades acima do permitido, estol, falha de motor, formação de gelo, e outras circunstâncias que interferem na controlabilidade da aeronave, onde tanto fatores humanos como mecânicos contribuem para o resultado acidente. Com isso, ainda nos dias de hoje, a complexidade destas ocorrências é tamanha que ainda não existe uma solução eficaz implementada para mitigar estes eventos relacionados a situação de *LOC-I* (IATA, 2015; Lambregts et. al., 2008).

Especificamente neste estudo, a formação de gelo em aeronaves se torna um fator muito importante e decisivo quando abordamos o tema de *LOC-I*, pois com esta formação ocorrendo, conseqüentemente a aeronave terá: um aumento do arrasto; uma diminuição da sustentação; e uma diminuição da controlabilidade, dependendo do tipo de gelo formado e do local (como visto em cenários de testes simulados, o gelo resulta em situações de diminuição da ação dos comandos, menor resposta das superfícies comandadas e assimetrias no empuxo dos motores) (Lynch, Khodadoust, 2002).

4 MÉTODO

Este estudo pretende analisar os eventos de *LOC-I* provocados pela formação de gelo em voo, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA. Para isso se utilizou uma abordagem qualitativa de análise, conceituada como uma pesquisa que não se preocupa com a representatividade numérica, mas com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, organização ou condição experimentada (Gerhardt, Silveira, 2009; Given, 2008; Godoy, 1995; Silva, 2018).

Para a obtenção de dados se utilizou uma técnica exploratória, definida por ações voltadas para uma busca na aproximação com o fenômeno analisado, através do levantamento de informações que conduzem ao conhecer mais a seu respeito. Geralmente este tipo de pesquisa se enquadra quando o assunto pesquisado é pouco explorado, buscando assim, desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias acerca do tema. Complementar a esta busca exploratória, se utilizou a técnica metodológica da pesquisa bibliográfica/documental, desenvolvida por meio da utilização de já existentes e elaborados materiais associados à temática analisada, identificados principalmente como livros e artigos científicos, de uma maneira geral (Gil, 2008; Oliveira, 2006).

De maneira prática, a busca pelos dados para este estudo se deu sobre as bases de dados disponíveis sobre ocorrências aeronáuticas com as características propostas pela questão de pesquisa, exclusivas do cenário da aviação civil nacional. As estratégias utilizadas foram realizadas pelos através dos dois passos seguintes (nem sempre frutíferas, mas importantes para a contextualização do problema):

- 1) Busca na base de dados do “Painel SIPAER”: de todas as ocorrências aeronáuticas que tivessem como fator contribuinte “meteorologia adversa” e/ou “perda de controle em voo”. Os resultados da pesquisa inicial se reduzem para um total de 79 acidentes, 33 ocorrências fatais e 100 fatalidades. Adicionando o item “perda de controle em voo” como “tipo de ocorrência”, houve uma redução no número de ocorrências para um total de 25 acidentes, 18 ocorrências fatais e 63 fatalidades. Destes resultados encontrados, nenhum foi relevante para o estudo proposto, pois quando de suas leituras, não houve a relação direta desejada pela questão de pesquisa (formação excessiva de gelo em voo ocasionando um *LOC-I*). Esta ferramenta acabou sendo desconsiderada para este estudo.
- 2) Com a negativa acima, a busca passou a ser na base de dados dos “Relatórios Finais do CENIPA”, utilizando-se a filtragem por “tipo”, para os eventos categorizados como “[*LOC-I*]” Os resultados obtidos após esta filtragem foi um total de 557 relatórios nesta categoria de eventos (acidentes/incidentes graves/incidentes). Após a pesquisa por termos como “formação de gelo” e “perda de controle”, de maneira conjunta, dentro destes 557

relatórios, apenas um apresentou estes fatores contribuintes presentes, se tornando então relevante, pois cumpria a relação direta citada no passo anterior.

- 3) Ampliando o passo anterior, outra filtragem foi feita mudando o enquadramento de “[LOC-I]” para “[OTHR]”, foram relacionados 297 relatórios finais. Após uma repetição da pesquisa feita no passo anterior (pelo termo “formação de gelo” e “perda de controle” dentro destes 297 relatórios), a análise identificou mais um evento relevante para este estudo, pois de forma semelhante a busca anterior, identificou-se uma outra ocorrência que teve a perda de controle em voo causada pela formação de gelo em voo.

Para analisar estes dois eventos se utilizou o método da revisão bibliográfica, que é um processo de busca, seleção, análise e síntese crítica da literatura existente sobre um tema específico. Consiste em examinar e avaliar os materiais disponíveis (mais especificamente os relatórios finais dos dois eventos selecionados, além de possíveis outros documentos disponíveis que tratam sobre eles, como reportagens à época), a fim de embasar teoricamente um estudo acadêmico (Given, 2008; Silva, 2018). Através disso, busca-se analisar as similaridades e discrepâncias encontrados nos eventos de *LOC-I* provocados pela excessiva formação de gelo durante o voo, ocasionando as referidas ocorrências aeronáuticas.

5 SIMILARIDADES E DISCREPÂNCIAS ENTRE OS EVENTOS ANALISADOS

Os dois eventos selecionados para esta análise foram os das aeronaves PP-PTU e PP-AJV. Sobre a primeira, a aeronave realizava a rota da empresa Trip Linha Aéreas com decolagem do Aeródromo Internacional Zumbi dos Palmares (SBMO), Maceió, AL, com destino ao Aeródromo Deputado Luís Eduardo Magalhães (SBSV), Salvador, BA, as 21h10min (UTC) com 4 tripulantes e 58 passageiros a bordo. Por volta de 33 minutos após a decolagem, por volta das 21h43min (UTC) já nivelada no FL160 a aeronave adentrou uma região de acúmulo de gelo, com o sistema de *anti-icing* ativado e o sistema de *de-ice* desativado. Em seguida, houve uma degradação do desempenho da aeronave levando a redução da velocidade indicada (IAS) de 202kt para 192kt. A tripulação escutou um ruído similar a um *stall* de compressor, seguido de forte vibração. Na sequência a aeronave atingiu 180kt, sendo os manetes de potência reduzidas para 20% de torque, o que resultou em uma redução da IAS para 148kt, o piloto automático foi desacoplado pelo comandante e a causa da vibração não foi identificada pela tripulação (CENIPA, 2013a; Flight Safety Foundation, 2023).

Já sobre o segundo evento, da aeronave PP-AJV, ela realizaria o voo do Aeródromo de Maringá (SBMG), para o Aeródromo de Congonhas (SBSP), com decolagem prevista por volta das 21h37min (UTC), com um piloto e quatro passageiros a bordo para um voo de transporte. O plano de voo foi preenchido por telefone pelo próprio piloto, definindo um plano para um voo IFR no FL210. O voo ocorreria no período noturno e prevaleciam em rota condições meteorológicas de voo por instrumentos (IMC). Cerca de 35 minutos após a decolagem, logo após o nivelamento da aeronave, houve a perda do contato radar com os órgãos de controle de tráfego aéreo. A aeronave foi encontrada em área rural, no dia seguinte, totalmente destruída e sem sobreviventes (CENIPA, 2013b; Branco, 2022).

Em ambos os casos as aeronaves eram bimotoras, como motores turbo hélices. Ambas as aeronaves eram certificadas para operação em região de formação de gelo, possuíam sistemas de proteção contra a formação de gelo e realizavam voos sob regras de voo por instrumentos no período noturno. A primeira se tratava de um voo regular de uma empresa de linha aérea, em uma empresa aérea onde os pilotos possuíam treinamentos recorrentes e cursos oferecidos pela empresa, sobre o voo em condições de formação de gelo; o que deveria resultar em um alto nível de padronização e conhecimento acerca da aeronave e operação aérea. A segunda ocorrência se tratava de um voo da aviação executiva em uma operação caracterizada por permitir a operação com apenas um piloto (o qual estava com sua habilitação IFR vencida).

Deste evento, a análise do relatório final trouxe uma baixa preocupação do piloto em manter um nível de padronização adequado, tampouco seguir o que era apresentado para ele nos manuais da aeronave (comprovável pela baixa adesão ao uso do checklist da aeronave). Verificou-se que o modo como o piloto em comando operou a aeronave naquelas condições meteorológicas, e como lidou com a operação de um modo geral foi considerado pela comissão de investigação um fator contribuinte para o resultado acidente.

Em ambos os casos as operações aéreas ocorriam em regiões com intensa formação meteorológica e isotermas entre 0°C e -10°C, faixa de temperatura favorável para a formação de gelo severo em voo. Com relação ao evento do PP-PTU, a aeronave operava em uma região com influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, com presença de TCUs e Altostratus; enquanto no segundo evento (PP-AJV), a aeronave experimentava a passagem de uma frente fria com formações em multicamadas, nuvens do tipo cumulus e trovoadas ativas. Em ambos os cenários a formação de gelo era propícia a ocorrer e de fato ocorreu, afetando ambas as aeronaves de forma evidente. É possível afirmar que quando se espera voar em uma região de formação de gelo as chances desta formação de gelo ocorrer são grandes e os pilotos devem estar preparados para lidar com esta situação.

Com relação a fase crítica de cada ocorrência, observou-se que a fase do voo em cruzeiro foi determinante em ambos os casos. Esta fase possui características de que a formação de gelo ocorra com maior facilidade, tendo como características: pouca mudança aerodinâmica na aeronave, pois a aeronave se encontrava mais estável em voo de cruzeiro; e pouca variação de velocidade, tornando-a facilmente um grande núcleo de congelamento. Em ambos os casos, o acúmulo de gelo não detectado e/ou não tratado foi o responsável pela degradação da performance das aeronaves e posteriormente a perda de controle em voo. Este resultado reforça a relação entre as situações de formação de gelo em aeronaves e a situação de *LOC-I*.

Evidencia-se então, que nos dois acidentes, a formação de gelo apresentou características que poderiam ser percebidas de maneira prévia na operação, através dos seguintes elementos: a diminuição da performance de ambas as aeronaves, a diminuição da IAS, a formação de gelo visualmente observada pelos pilotos em voo, e posteriormente, a diminuição das respostas dos comandos aplicados por ambas as tripulações. Tais indícios presentes corroboram a ideia de que o gelo pode acometer diversas regiões da aeronave, afetando a operação aérea de diversas formas; e com sua identificação precoce pelo operador, é possível tomar ações para mitigar o perigo.

Em ambos os casos houve falhas humanas significativas, reforçando a falta de familiaridade de alguns pilotos com situações de formação de gelo e falhas nos treinamentos destas tripulações. Na análise do incidente grave da aeronave PP-PTU, a tripulação reconheceu a formação de gelo, porém, não tomaram ações corretivas perante a situação (como por exemplo, manter o sistema de *de-ice* desligado a todo momento). A ausência do *Red Bug* (que deveria ser ajustada manualmente), pode ter sido um fator determinante para a diminuição da consciência situacional do comandante com relação a sua velocidade mínima segura para operação em região de formação de gelo.

Na análise do acidente da aeronave PP-AJV também foi possível observar uma consciência situacional diminuída por parte do comandante com relação a operação em área de formação de gelo, ignorando por diversas vezes avisos da passageira sobre a formação de gelo no exterior da aeronave. O sistema de *de-ice* da aeronave não foi acionado, e a utilização do piloto automático em ambas as situações de voo em formação de gelo sem a devida resposta ativa da tripulação, foi um fator que favoreceu a perda de controle da aeronave.

Apesar de ambas as aeronaves possuírem sistemas de proteção contra a formação de gelo, e serem homologadas para este tipo de operação, em nenhum dos dois eventos as tripulações realizaram o uso devido dos sistemas da aeronave para mitigar a formação de gelo. Identificou-se em ambos os casos, que os pilotos estavam pouco familiarizados com a formação de gelo em voo, suas causas e resultados, não agindo adequadamente quando encontraram esta situação crítica. A ausência ou falha na utilização dos sistemas de proteção contra o gelo corroboraram para que a situação de *LOC-I* ocorresse, pois com a demora nas ações para mitigar a formação de gelo na aeronave, houve o

surgimento de um ambiente propício para que o gelo apenas continue a se formar, afetando ainda mais a aeronave.

A perda da consciência situacional pelas tripulações, atuação inadequada frente a situações de performance degradada da aeronave, situações de *stall* e sua recuperação e a fase de cruzeiro como sendo o ponto crítico para a operação aérea no que diz respeito a operação em regiões de formação de gelo; dizem muito sobre como ambas as tripulações foram pegadas de surpresa com relação aos resultados da formação de gelo em suas aeronaves. Ambas as tripulações puderam observar que estavam voando em região de formação de gelo e que possivelmente teriam que combater esta condição em voo, porém, mesmo após a observação da formação de gelo, ambas as tripulações subestimaram os resultados desta formação de gelo, gerando assim uma baixa consciência situacional perante esta situação meteorológica adversa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou compreender e analisar os eventos de *LOC-I* provocados pela formação de gelo em voo, a partir dos relatórios de ocorrências aeronáuticas emitidos pelo CENIPA. Foi possível evidenciar, a partir das análises feitas, que mesmo com o avanço tecnológico nos sistemas de proteção contra a formação de gelo; falhas na sua operação, na percepção e consciência situacional da tripulação e na execução de procedimentos adequados para combater a formação de gelo ainda ocorrem; sendo fatores críticos que afetam a segurança de voo e contribuem para que ocorrências como as analisadas continuem gerando ocorrências graves resultantes da formação de gelo em voo.

Este estudo identificou que a falta de treinamento específico, o descumprimento de normas e procedimentos, a baixa consciência situacional e a não utilização dos sistemas embarcados na aeronave; trouxeram ameaças adicionais nas operações aéreas que são afetadas pela formação de gelo em voo e como estas situações contribuíram para que o resultado destas ocorrências fossem a perda de controle em voo. Além disso, este estudo evidenciou a importância de uma cultura organizacional voltada a segurança onde seja priorizado o treinamento dos pilotos para que seja possível combater esta situação adversa em voo.

Assim, conclui-se que o combate de situações como a formação de gelo em voo não deve se limitar apenas ao aprimoramento dos sistemas embarcados nas aeronaves, mas deve incluir o fortalecimento técnico dos pilotos, dando ênfase na formação dos tripulantes por meio de treinamentos que fortaleçam a tomada de decisão destes tripulantes e o reconhecimento de situações adversas como a formação de gelo em voo. Após as análises feitas foi possível se evidenciar que mesmo com sistemas aprimorados de proteção, não é possível substituir o papel essencial de uma tripulação na aplicação correta de procedimentos e na tomada de decisão.

Estudos futuros poderiam se aprofundar e apresentar diferentes meios de treinamentos para mitigar os resultados da formação de gelo em voo, ou ainda investigar quantitativamente a incidência de ocorrências que tiveram a formação de gelo como algo presente na aviação brasileira ao longo das décadas (não somente nos eventos já acontecidos, relatados pelos relatórios de investigação). Estes desdobramentos podem contribuir para que políticas mais eficazes sejam implementadas para a prevenção de situações de *LOC-I* como resultado da formação de gelo em voo.

7 REFERÊNCIAS

- ATR. (2011). *Cold weather operations: be prepared for icing*. ATR Customer Services. p. 9-11. Acesso em: 25 maio 2025. Disponível em: <https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/atr/atr-cold-weather-operations.pdf>.
- AOPA. (2004). *Aircraft Owners and Pilots Association. Aircraft Deicing and Anti-icing Equipment*. Acesso em: 08 jul 2025. Disponível em: <https://www.aopa.org/-/media/files/aopa/home/pilot%20resources/asi/safety%20advisors/sa22.pdf>

- Branco, A. (2022). *Gelo em voo no Brasil | Acidente com King Air C-90 PP-AJV*. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TL3lipeKLWo>.
- BOEING. (2025). *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents - Worldwide Operations | 1959-2023*. Acesso em: 08 jul. 2025. Disponível em: https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf
- Carrière, J. M.; Lainard, C.; Le Bot, C.; Robart, F. (2000). *A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. Meteorological Applications*. Toulouse, v. 7, n. 7, p. 229-238. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/meteorological-applications/article/abs/climatological-study-of-surface-freezing-precipitation-in-europe/71856EDC7E78FFEE715AF8C57A6DD600>. doi: <https://doi.org/10.1017/S1350482700001560>.
- CENIPA. (2013a). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Relatório Final IG-136/CENIPA/2013*. Acesso em: 30 out. 2024. Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/PP-PTU_26_07_2013_IG_Port..pdf.
- CENIPA. (2013b). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Relatório final A-025/CENIPA/2013*. Acesso em: 4 nov. 2024. Disponível em: https://sistema.cenipa.fab.mil.br/cenipa/paginas/relatorios/rf/pt/RF_A-025CENIPA2013_PP-AJV.pdf.
- CENIPA. (2017). *Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Norma do Comando da Aeronáutica. Brasília: Protocolos De Investigação De Ocorrências Aeronáuticas Da Aviação Civil Conduzidas Pelo Estado Brasileiro (NSCA 3-13)*. Ministério da Defesa do Brasil. Acesso em: 26 maio 2025. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/cenipa/index.php/legislacao/seguranca-de-voo?download=112:nsca3-13>.
- Cober, S. G (1996). *An example of supercooled drizzle drops formed through a collision-coalescence process*. *Journal of Applied Meteorology, Ontario*, v. 35, n. 1, p. 2250-2260. Acesso em: 13 out. 2024. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/35/12/1520-0450_1996_035_2250_aeosdd_2.0.co_2.xml.
- Cober, S. G.; Isaac, G. A.; Strapp, J. W. (2001). *Characterizations of aircraft icing environments that include supercooled large drops*. *Journal of Applied Meteorology*. Downsview, v. 40, n. 1, p. 1-6. Acesso em: 7 out. 2024. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/40/11/1520-0450_2001_040_1984_coaiet_2.0.co_2.xml.
- Da Silva, G.; Silveira, O.; Zerbini, E. (2003). *Airfoil anti-ice system modeling and simulation*. In: *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 41. Reno. Anais [...]. Reno: AIAA. Acesso em: 9 nov. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2003-734>.
- Flight Safety Foundation. (2023). *Incident report: Wikibase 317462*. Acesso em: 18 jun. 2025. Disponível em: <https://asn.flightsafety.org/wikibase/317462>.
- Gerhardt, T. E.; Silveira, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: UFRGS. p. 120. Acesso em: 15 abril 2025. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. São Paulo: Atlas. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://ayanrafael.com/wp-content/uploads/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9cnicas-de-pesquisa-social.pdf>.
- Given, L. M. (2008). *The sage encyclopedia of qualitative research methods*. Thousand Oaks, CA: Sage.

- Godoy, A. S. (1995). *Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais*. *RAE - Revista de Administracao de Empresas*, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 20–29. Acesso em: 24 maio 2025. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/rae/article/view/38200>.
- González, S. F. (2017). *Analysis and numerical simulation of an aircraft icing episode near Adolfo Suárez Madrid-Barajas International Airport*. Madrid: Universidade Complutense de Madrid. Artigo de graduação. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809517307676>.
- IATA (2015). *International Air Transport Association. Loss of control in-flight accident analysis report 2010-2014*. Montreal-Geneva: IATA. v. 1, n. 1, p. 1-42. Acesso em: 21 out. 2024. Disponível em: <https://flightsafety.org/wp-content/uploads/2017/07/IATA-LOC-I-1st-Ed-2015.pdf>.
- Lambregts, A. A.; Nesemeier, G.; Newman, R.; Wilborn, J. (2008). *Airplane upsets: old problem, new issues*. In: *Aiaa Modeling And Simulation Technologies Conference And Exhibit, Honolulu*. Anais [...]. Honolulu: AIAA, 2008. Acesso em: 13 out. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2008-6867>.
- Lewis, W. (1951). *Meteorological aspects of aircraft icing*. In: *Compendium of Meteorology*. Washington: American Meteorological Society. E-book. Acesso em: 14 out. 2024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=YIqmDAAAQBAJ>.
- Lynch, F. T.; Khodadoust, A. (2002). *Effects of ice accretions on aircraft aerodynamics*. Yorba Linda, California, v. 37, n. 7, p. 5-24. Acesso em: 7 out. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042101000185>.
- Morcrette, C. (2019). *Development and evaluation of in-flight icing index forecast for aviation*. *Weather and Forecasting*. Exeter, United Kingdom, v. 34, n. 3, p. 731–750. Acesso em: 28 ago. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/34/3/waf-d-18-0177_1.xml. 2024. doi: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0177.1>.
- Oliveira, M. C. (2006). *Metodologias de pesquisa adotadas nos estudos sobre Balanced Scorecard*. XIII Congresso Brasileiro de Custos, [s. l.]. Acesso em: 09 jul. 2025. Disponível em: <https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/download/1701/1701>.
- Politovich, M. K. (2015). *Aircraft icing*. In: *Encyclopedia of Atmospheric Science*. 2. ed. Boulder: Academic Press. E-book. Acesso em: 7 nov. 2024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8lpzAwAAQBAJ>.
- Sánchez, J. L. (2014). *Weather features associated with aircraft icing conditions: a case study*. *The Scientific World Journal*, León, v. 2014, n. 1, p. 1-18. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2014/279063>.
- Silva, R. M. (2018). *Estudos Qualitativos: enfoques teóricos e técnicas de coleta de informações*. [S. l.]: Sobral.
- Vukits, T. (2002). *Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components*. In: *AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 40.*, Reno. Anais [...]. Greenville: AIAA. p. 3-4. Acesso em: 14 out. 2024. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-811>.
- Wu, Z. (2018). *Aircraft icing: an ongoing threat to aviation safety*. Beijing: Faculdade de Ciências Aeronáuticas e Engenharia. Artigo de graduação. Acesso em: 28 ago. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817317601>.
- Xue, X.; Qiang, G.; Feng, Y.; Luo, T. (2022). *Experimental study on the adhesion strength of the frozen ice for aircraft moving parts*. Xian: Universidade Politécnica do Noroeste. Artigo de graduação. Acesso em: 4 set. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2226-4310/9/10/589>.