

El Englamiento y sus efectos en el ATR 72-500



Tanda Kyranos'24

Escuela Militar de Aeronáutica.

Aprendizaje Basado en Proyectos

Tte. Cnel. (Av.) J. Martirena, Cap. (Nav.) J. Acuña

y Cap. (Av.) (R) Dr. E. Mazzucchelli

05 de noviembre de 2025.



Índice

1- Resumen	3
2- Introducción	3
2.a- Problema	3
2.b- Justificación:	4
3- Objetivos de análisis:	5
4- Análisis	5
4.a- Meteorología	5
4.a.1 - Englamiento	5
4.a.2 - Tipos de englamiento	6
4.a.3 - Análisis de datos meteorológicos del día del accidente	8
4.a.4 - Hallazgos Preliminares de la Investigación según CENIPA	11
4.b - Mecánica y sistemas aeronáuticos:	12
4.b.1 - Efecto del englamiento en la aeronave	12
4.b.2 - Sectores de englamiento en la aeronave	13
4.b.3 - Motores del ATR 72-500	14
4.b.4 - Alertas instrumentales y percepción del riesgo	15
4.b.5 - Sistemas de antihielo y climatización	16
4.c - Aerodinámica	18
4.c.1 - Formación de hielo sobre el borde de ataque del perfil	18
4.c.2 - Tirabuzón Plano	19
5. Conclusiones	21
6. Bibliografía	23

1- Resumen

En el marco del accidente del vuelo 2283 de Voepass, operado por la aeronave ATR 72-500 del 9 de agosto de 2024, ocurrido en Vinhedo, São Paulo, analizamos las fallas de los sistemas de antihielo de la aeronave, explicamos cómo el engelamiento puede degradar la sustentación, aumentar la resistencia y recortar peligrosamente los márgenes de control. Tomamos como ejemplo dicho accidente para mostrar la convergencia de factores meteorológicos, aerodinámicos, de sistemas y operativos que derivaron a una pérdida de control generando que la aeronave ingrese en un tirabuzón irrecuperable.

2- Introducción

El 9 de agosto de 2024, el vuelo 2283 de Voepass Linhas Aéreas, operado por un ATR 72-500, sufrió un accidente en Vinhedo, São Paulo, tras entrar en un tirabuzón plano provocado por condiciones severas de engelamiento. La acumulación de hielo en las superficies de control y sustentación, sumada a fallas en los sistemas de protección y a factores meteorológicos críticos, derivaron en la pérdida de control y en la muerte de los 62 ocupantes. Este siniestro es un ejemplo sobre cómo un factor puede desencadenar varios fenómenos, las causas influyentes se pueden analizar desde la aerodinámica, meteorología y los sistemas.

2.a- Problema

El accidente, según el Centro de Investigación y Prevención de Accidentes Aeronáuticos (CENIPA), fue causado por una cadena de fallas críticas que culminaron en la entrada de la aeronave en un tirabuzón plano irrecuperable. La aeronave volaba en condiciones meteorológicas adversas con agua superenfriada, lo que provocó una

rápida y crítica acumulación de hielo en sus superficies, causando una pérdida significativa de sustentación y un aumento de la resistencia. La acumulación de hielo, junto con fallas intermitentes en el sistema de deshielo/antihielo, que se activaba y desactivaba repetidamente a pesar de la advertencia de engelamiento, permitió que la capa de hielo progresara a un punto crítico. La tripulación no pudo descender a mejores condiciones por indicaciones del tráfico aéreo, manteniéndose en la situación peligrosa.

La tripulación se dio cuenta de la cantidad de hielo presente poco antes de que se encendiera la luz que indica la aproximación a la velocidad de pérdida de sustentación.

Finalmente, la aeronave entró en pérdida y luego en una barrena plana, una rotación incontrolable e irrecuperable para este tipo de avión de transporte.

2.b- Justificación:

Bajo el proyecto de investigación en la metodología Aprendizaje Basado en Proyectos de los Cadetes de Primer Año de la Escuela Militar de Aeronáutica durante el año 2025, se propuso analizar el accidente anteriormente mencionado para comprender cómo distintos factores aerodinámicos, meteorológicos y mecánicos se encadenaron hasta provocar la tragedia. Con ello, los aspectos de aerodinámica permitieron estudiar cómo la formación de hielo modificó el flujo de aire sobre las alas y redujo la sustentación hasta inducir la pérdida y el tirabuzón plano.

Desde el punto de vista meteorológico, las condiciones atmosféricas en vuelo según los avisos de SIGMET (Significant Meteorological Information), eran de engelamiento severo propicio para la acumulación de hielo. A través de la

comprensión de los motores y sistemas aeronáuticos, se analizaron los equipos de protección antihielo, las fallas reportadas en el sistema de deshielo, las alertas en cabina y el rol crítico de los motores en la gestión de energía y de aire caliente para prevenir el engelamiento.

3- Objetivos de análisis:

Analizar las características técnicas del ATR 72-500 que lo protegen del engelamiento, sus posibles fallas y limitaciones en el sistema o en la aerodinámica.

Definir los fenómenos meteorológicos que producen engelamiento y afectan la operatividad de la aeronave. También, cómo el engelamiento afecta la sustentación de la aeronave y enumerar las posibles advertencias que evidencian dicha situación.

4- Análisis

4.a- Meteorología

En esta sección se abordarán aspectos claves de meteorología aeronáutica como lo son la formación de hielo sobre la aeronave por impacto de gotas de agua superenfriadas, condicionada por temperatura, contenido de agua líquida y tamaño de gota. Se analizarán también los umbrales térmicos y la altura de la isoterma de 0 °C, los entornos nubosos de mayor peligro, así como escenarios con agua helada, los tipos de hielo principales y su impacto aerodinámico.

4.a.1 - Engelamiento

La información brindada por las clases teóricas de meteorología define al engelamiento como un fenómeno que se produce en un entorno de alta humedad

relativa y temperatura bajo cero. Las condiciones de mayor riesgo para la formación de hielo en vuelo se encuentran en el rango de temperaturas entre 0 °C y -20 °C. Es importante destacar que el hielo claro, es más perjudicial, se forma de manera más eficiente en un rango más estrecho, entre -2 °C y -10 °C. En estas condiciones, las grandes gotas de agua líquida superenfriada se adhieren al avión y se congelan rápidamente, acumulando hasta 1 cm por cada 7 MN de vuelo. La presencia de nubes cumuliformes o estratiformes en un ambiente frontal, especialmente con turbulencia moderada a severa, aumenta el riesgo de encontrar estas condiciones.

La acumulación de hielo en las superficies de una aeronave tiene efectos perjudiciales inmediatos y progresivos sobre su rendimiento. El más significativo es la degradación del perfil aerodinámico, lo que resulta en una reducción drástica de la sustentación (entre 30% y un 50%) y un aumento sustancial de la resistencia al aire. Esto a su vez incrementa la velocidad de entrada en pérdida y reduce el ángulo de ataque crítico, haciendo que la aeronave sea más propensa a perder el control.

Además de las afectaciones directas sobre la sustentación y la resistencia, el hielo puede causar otros problemas críticos como el mal funcionamiento de los instrumentos, debido a que las tomas de presión de aire, como los tubos pitot y las tomas estáticas, pueden obstruirse causando lecturas erróneas de la velocidad. La acumulación de hielo puede restringir o bloquear el movimiento de superficies de control móvil como alerones, timones y flaps.

4.a.2 - Tipos de engelamiento

La formación de hielo en las aeronaves se produce por la acumulación de gotas de agua líquida superenfriada, que se congelan al impactar sobre una superficie a una temperatura inferior a 0 °C. La severidad del engelamiento está directamente

relacionada con la concentración, el tamaño de las gotas y la temperatura del aire. Según Ledesma y Baleriola (2003) existen cuatro tipos principales de hielo en vuelo, cada uno con un proceso de formación y un impacto aerodinámico distinto:

El hielo claro o transparente se forma con temperaturas entre los 0 °C y los -10 °C y es el tipo de engelamiento más peligroso. El hielo claro se forma cuando grandes gotas de agua superenfriadas impactan contra el borde de ataque del ala y se congelan poco a poco. De esta forma, se crea una placa de hielo transparente en toda la parte superior del ala, conocida como extradós.



El hielo opaco o granular se forma a temperaturas más bajas que el hielo claro, en torno a los -15 °C, y es el resultado del engelamiento casi instantáneo de pequeñas gotas de agua al golpear el borde de ataque. A diferencia del hielo claro, el granular tiene una textura rugosa y porosa, con un aspecto blanco y opaco. Esto se debe a que las gotas no tienen tiempo de extenderse antes de congelarse, lo que genera una acumulación de cristales de hielo con aire atrapado entre ellos.



La nieve húmeda está compuesta por gotitas de agua superenfriadas y cristales de hielo, que al adherirse al avión producen el engelamiento a temperaturas próximas a 0 °C.



La escarcha es un fenómeno típico de invierno, se produce cuando la capa de aire entra en contacto con el suelo rico en humedad. El vapor de agua se sublima, transformándose directamente en hielo, depositándose sobre la superficie fría. Si el avión está aparcado a la intemperie queda cubierto de una capa de hielo.



4.a.3 - Análisis de datos meteorológicos del día del accidente

Las condiciones meteorológicas del día del accidente del Vuelo 2283 no solo eran propicias al engelamiento, sino que representaban un escenario de alto riesgo que había sido anteriormente pronosticado. El 9 de agosto, entre las 15:30 y las 19:30 UTC, había dos avisos meteorológicos significativos (SIGMETs) para la ruta del vuelo sur de Brasil. Estos avisos, emitidos por las autoridades de aviación, alertaban sobre la presencia de engelamiento severo entre los niveles de vuelo FL120 (12.000 ft) y FL210 (21.000 ft). La descripción de los avisos, indicaban que dicho fenómeno persistiría durante varias horas en la misma zona. La existencia de estas advertencias oficiales a un nivel de riesgo tan elevado establece que el peligro era conocido y previsible, y no una condición inesperada.

El sondeo atmosférico realizado en São Paulo esa mañana proporcionó datos cruciales que confirmaban las condiciones ideales para el engelamiento severo. La isoterma de 0 °C (temperatura a la que el agua se condensa) se encontraba cerca del nivel de vuelo FL120.

A la altitud de crucero de la aeronave, FL170 (17.000 ft), la temperatura ambiente era de -9 °C. Este rango de temperatura (entre -2 °C y -10 °C) es conocido

como el más eficiente para la formación de hielo claro y mixto, especialmente en presencia de alta humedad relativa, un factor también presente en esa altitud según el sondeo.

Adicionalmente, la carta de tiempo significativo de la superficie a FL250 mostró un frente frío activo cruzando la región, con cúmulos de gran desarrollo vertical (TCU/CB) envueltos en capas extensas de altocúmulos y altoestratos. Este tipo de ambiente frontal y convectivo es conocido por concentrar grandes concentraciones de agua líquida superenfriada, y en particular, de gotas grandes, que son las más propensas a causar una acumulación rápida de hielo claro. La combinación de bajas temperaturas, alta humedad, nubes frontales profundas y turbulencia creó un escenario de riesgo altamente concentrado y de extrema peligrosidad.

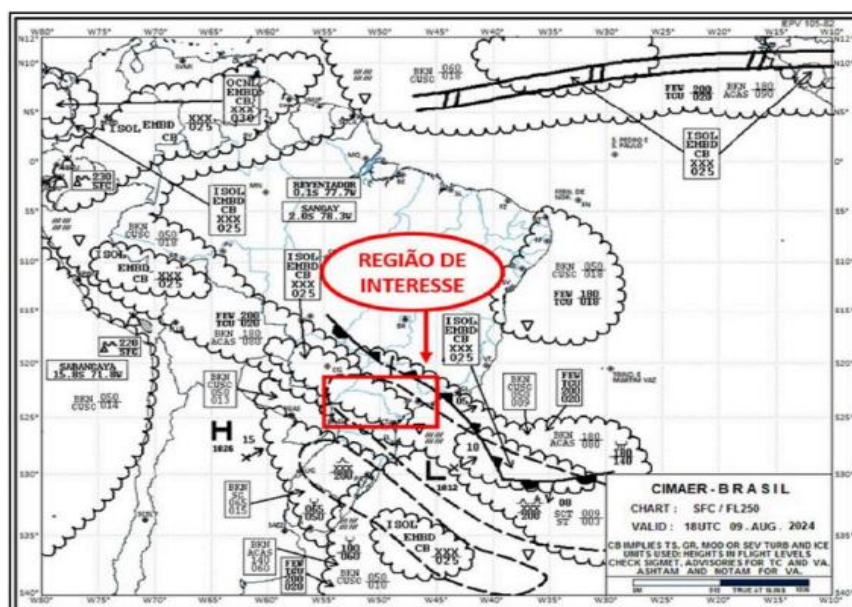


Figura 1 - SIGWX desde la superficie a FL250 a las 18:00 (UTC) del 09 de agosto de 2024. Resaltado en el polígono rojo, la región de interés.

Tabla 1:

El análisis de la trayectoria de vuelo, basado en los datos de las cajas negras, revela una secuencia de eventos que se desarrollaron rápidamente en los últimos minutos antes del impacto.

Hora (UTC)	Hora (LOCAL)	Evento Clave
16:18:47	13:18:47	La aeronave contacta la torre de control de aproximación de São Paulo (APP-SP) para reportar que está en el punto de descenso ideal.
16:19:19	13:19:19	APP-SP solicita a la aeronave que mantenga su altitud debido al tráfico.
16:20:33	13:20:33	La aeronave recibe autorización para entrar en la posición SANPA, manteniendo su altitud.
16:20:50	13:20:50	La aeronave comienza un giro a la derecha hacia la posición SANPA.
16:20:57	13:20:57	Se activa una alerta de pérdida (stall alert).
16:21:09	13:21:09	La aeronave se inclina a la izquierda, luego a la derecha, antes de entrar en un tirabuzón plano hasta el impacto.
16:22:02	13:22:02	APP-SP hace cinco llamadas a la aeronave sin obtener respuesta. Los registradores de vuelo dejan de funcionar.

Tabla 1: Cronología de los Eventos Finales del Vuelo 2283 (Basado en el informe Preliminar de CENIPA)

La cronología demuestra que, en menos de un minuto, la situación del avión pasó de ser una operación de vuelo normal a una situación de pérdida total de control. Esta rápida degradación del rendimiento de la aeronave es característica de un evento de engelamiento severo que compromete de forma súbita las superficies aerodinámicas críticas. La velocidad de descenso, que alcanzó una tasa de 24.000 pies por minuto, confirma la naturaleza catastrófica de la pérdida de sustentación.

4.a.4 - Hallazgos Preliminares de la Investigación según CENIPA

En el 2024 el informe preliminar del Centro de Investigación y Prevención de Accidentes Aeronáuticos (CENIPA), con la información extraída de las cajas negras del avión, arrojó “tres” hallazgos clave: Consciencia de la tripulación, la grabadora de voz de cabina reveló que los pilotos estaban al tanto de la acumulación de hielo y del estado del sistema de deshielo; Activación del sistema de deshielo, el sistema se activó y desactivó tres veces durante el vuelo, lo que podría indicar un funcionamiento errático, una activación tardía o un fallo intermitente, según lo planteado por los investigadores, el sistema opera en ciclos de 1 a 3 minutos; Ausencia de emergencia declarada, en ningún momento la tripulación del vuelo 2283 declaró una emergencia, lo que sugiere que la situación se desarrolló con una rapidez tal que no les dio tiempo para comunicar el peligro antes de perder el control de la aeronave.

El análisis de los datos meteorológicos, los hallazgos de la investigación preliminar y el historial de la aerolínea apunta a un accidente que no fue un simple suceso aleatorio. La tragedia fue el resultado de una convergencia de factores que interactuaron de manera fatal.

4.b - Mecánica y sistemas aeronáuticos:

Como hemos visto en las clases del Teniente Coronel (Aviador) José Martirena, el engelamiento representa un riesgo significativo al impactar en las tomas de aire y las hélices de los motores Pratt & Whitney Canadá PW127F/M. Este fenómeno afecta el rendimiento, la seguridad y la estabilidad de la aeronave.

4.b.1 - Efecto del engelamiento en la aeronave

Según la página web Academy (2022), en el ATR 72-500, al igual que en el resto de las aeronaves, el engelamiento afecta directamente a los bordes de ataque de las alas, superficies de cola, tomas de aire de los motores Pratt y Whitney PW127, palas de hélices, parabrisas y antenas.

La acumulación de hielo genera varios factores que afectan las condiciones de la aeronave, modifica el perfil aerodinámico, incrementa la resistencia, reduce la sustentación y puede favorecer la entrada en pérdida, por lo que el ATR 72-500 incorpora sistemas de protección contra el engelamiento, como calefactores, dispositivos antihielo y sistemas de deshielo, que deben activarse según las indicaciones del manual de operación y las alertas del detector de hielo.

En operaciones con el ATR 72-500, es esencial para la seguridad monitorizar constantemente las condiciones meteorológicas, la activación oportuna de los sistemas antihielo y la atención inmediata a cualquier indicio de pérdida de rendimiento aerodinámico.

4.b.2 - Sectores de engelamiento en la aeronave

Conforme a las clases teóricas dictadas por la Cap. (Nav.) J. Acuña en la asignatura Meteorología y por el Cap. (Av.) (R.) Dr. E. Mazzuchelli en la asignatura Aerodinámica, una de las primeras superficies en acumular hielo suele ser aquellas con bordes de ataque delgados, como antenas, palas de hélice, estabilizadores horizontales, timón y puntales del tren de aterrizaje. Estas estructuras, debido a su geometría y exposición directa al flujo de aire, son especialmente vulnerables a la formación de hielo.

Los instructores explicitan que la acumulación de hielo modifica la forma aerodinámica de cada superficie, alterando así la distribución de presión y afectando la sustentación. La presencia de hielo también aumenta el peso de la aeronave, lo que puede afectar el centro de gravedad y la maniobrabilidad. Las alas, siendo las últimas en acumular hielo, presentan un impacto directo sobre la sustentación total y el control del avión.

En el caso de las hélices, la formación de hielo se manifiesta inicialmente en el cono o cúpula, extendiéndose luego hacia las palas. La acumulación irregular provoca un desequilibrio dinámico que genera vibraciones significativas.

Los instrumentos de vuelo, como el tubo pitot y los puertos de presión estática son esenciales para la medición precisa de parámetros como altitud, velocidad aérea y velocidad vertical, la obstrucción por hielo provoca lecturas erróneas que pueden inducir al piloto a tomar decisiones incorrectas. Del mismo modo, se ven afectados los sistemas de comunicación, la formación de hielo en las antenas de radio puede degradar significativamente la recepción de señales de Radiofaro Omnidireccional de Muy Alta Frecuencia (VOR), En conjunto a estos factores la visibilidad puede verse

seriamente comprometida como consecuencia de la acumulación de hielo o escarcha en los parabrisas.

4.b.3 - Motores del ATR 72-500

Tal como se establece en los manuales de la aeronave ATR 72-500 Pilot Handbook, ATR 72-500 Quick Reference Handbook (QRH) y Limitaciones de operación ATR 72-600, el ATR 72-500 es una aeronave turbohélice reconocida por su eficiencia, fiabilidad y adaptabilidad para operar en rutas de corto y medio alcance. Su sistema de propulsión está conformado por dos motores Pratt & Whitney Canadá PW127F/M, de unos 2.475 HP cada uno. Estos motores no solo impulsan la aeronave, sino que también alimentan diversos sistemas críticos a bordo, como la presurización de cabina, el aire acondicionado y los sistemas antihielo.

Cada motor de la aeronave está equipado con un sistema de deshielo en las tomas de aire, que utiliza aire caliente extraído de la última etapa del compresor de la turbina, y las hélices cuentan con sistemas eléctricos de deshielo. Estas protecciones son vitales durante el vuelo en condiciones de formación de hielo, donde la acumulación de hielo puede obstruir el flujo de aire hacia los motores, lo que altera la capacidad de aspiración de las turbinas pudiendo provocar un apagamiento (flame out), una pérdida de compresor (stall) o daños internos en el motor.

Además de la propulsión, los motores proporcionan energía neumática a los *packs* del sistema de aire acondicionado, que también gestionan la presurización de cabina. En el caso de que uno de los *packs* no esté operativo, la altitud máxima de vuelo en dicha aeronave se ve restringida a FL170 (17.000 pies), lo cual afecta la eficiencia operativa del vuelo, el consumo de combustible y la planificación de rutas,

especialmente en condiciones meteorológicas adversas o con obstáculos en la trayectoria.

4.b.4 - Alertas instrumentales y percepción del riesgo

Las alertas en cabina cumplen un rol fundamental para garantizar un vuelo seguro, ya que la tripulación depende de ellas para desempeñar su labor sin asumir riesgos innecesarios. Estas alertas se dividen en dos categorías: 1) prevención y detección, y 2) sistemas para eliminar o prevenir la acumulación de hielo.

En cuanto a la prevención y detección, el detector de hielo (*Ice Detector*) funciona como un sensor que detecta el inicio de la formación de hielo en la aeronave. Las luces de inspección de alas y motores, instaladas en los bordes de ataque y en las entradas de motor, permiten al piloto verificar visualmente la acumulación de hielo, especialmente durante vuelos nocturnos. Por su parte, el sistema de advertencia de engelamiento (*Ice Warning System*) emite alertas visuales y/o sonoras en cabina cuando se registra acumulación de hielo. A ello se suma la sonda de temperatura total del aire (*TAT probe*), que mide la temperatura real del aire y permite identificar si la aeronave se encuentra en condiciones propicias para el engelamiento, generalmente entre 0 °C y -20 °C. Por ejemplo, si el TAT indica -5 °C y el avión atraviesa una zona con nubes, la tripulación sabe que existe una alta probabilidad de formación de hielo.

En cuanto a los sistemas para eliminar o prevenir acumulación, los sensores como el tubo pitot, AOA, TAT y Static Ports cuentan con sistemas de calefacción eléctrica que evitan su obstrucción. El *Wing Anti-Ice System* utiliza aire caliente sangrado de los motores o resistencias eléctricas para mantener libres de hielo los bordes de ataque de las alas, mientras que el *Engine Anti-Ice System* protege los motores enviando aire caliente a las entradas de aire y carenados. Otro recurso son

las botas neumáticas, que consisten en bandas de goma en los bordes de ataque que se inflan y desinflan para romper el hielo adherido. Asimismo, tanto las hélices como los parabrisas pueden incorporar sistemas eléctricos de deshielo mediante resistencias que derriten el hielo o impiden su formación, asegurando la visibilidad del piloto. Finalmente, en tierra se emplean fluidos anti-hielo o deshielo (tipos I, II, III o IV), aplicados en alas, estabilizadores y superficies de control antes del despegue.

En síntesis, estos sistemas y advertencias trabajan en conjunto para prevenir accidentes, ya que informan a la tripulación sobre el estado de la aeronave y permiten aplicar procedimientos de emergencia, como activar sistemas manuales, incrementar la potencia, o descender fuera de la capa de hielo. En contraste, si las alertas son ignoradas o minimizadas, existe una elevada probabilidad de que se acumulen condiciones anormales durante el vuelo, aumentando el riesgo de accidente.

Un ejemplo de esta situación puede observarse en el accidente de Voepass, en el cual la combinación de numerosas alertas de hielo y de rendimiento, seguidas de señales de stall, puso de manifiesto que el sistema de advertencias estaba indicando un escenario extremo. En la práctica operacional, este tipo de alertas deben considerarse de máxima prioridad para salvaguardar la seguridad en vuelo.

4.b.5 - Sistemas de antihielo y climatización

Según el manual ATR 72-500 Pilot Handbook, ATR 72-500 Quick Reference Handbook (QRH) El ATR 72-500 cuenta con diversos sistemas para prevenir y remover la formación de hielo en zonas críticas de la aeronave. Estos sistemas son: la calefacción eléctrica, esta se encuentra en superficies como el borde de ataque de las alas, hélices y parabrisas; el aire caliente, estos son los gases de escape de los motores, se canalizan a través de las tomas de aire hacia los neumáticos “botas”

ubicados en el borde de ataque, tanto de las alas como del empenaje de la aeronave; y la aplicación de líquidos anticongelantes, durante la preparación en tierra, se aplican líquidos químicos diseñados para eliminar hielo existente (de-icing) y prevenir nueva formación (anti-icing). Estos líquidos varían en composición y duración, y su correcta aplicación es vital para garantizar una partida segura del avión.

Sistemas antihielos

Las aspas de las hélices cuentan con resistencias eléctricas instaladas en sus zonas internas, las cuales se activan de manera sistemática para mantener un equilibrio en la carga eléctrica; este sistema puede funcionar tanto en forma manual como automática. De manera complementaria, el parabrisas (windshield) incorpora calentadores de alta potencia que actúan directamente sobre el vidrio, evitando así la formación de hielo y favoreciendo el desempañ, lo que garantiza una adecuada visibilidad y seguridad durante el vuelo.

Las tomas de aire del compresor del motor (Engine Air Inlet) usa el aire caliente proveniente desde los gases de escape del motor y los utiliza para calentar las superficies metálicas que rodean la admisión de este.

Sistema de deshielo

Utiliza el aire caliente proveniente del escape del motor y los canaliza hacia los neumáticos ubicados en los bordes de ataque, tanto de las alas como del empenaje de la aeronave. Este aire caliente infla a los neumáticos “botas” y rompe el hielo formado en las zonas más críticas de la aeronave en caso de engelamiento severo.

4.c - Aerodinámica

Según los principios establecidos en Aerodinámica y Actuaciones del Avión de Aníbal Isidoro Carmona (2009) la formación de hielo sobre el ala de una aeronave genera una superficie rugosa e irregular que altera significativamente el comportamiento aerodinámico del perfil (Figura 2). Esta rugosidad modifica la estructura de la capa límite, reduciendo la energía de la corriente de aire que fluye sobre el ala. Como consecuencia directa, se incrementa la resistencia al avance (drag), lo que afecta negativamente la eficiencia del vuelo. Además, el coeficiente de sustentación máximo ($C_{L_{máx}}$) disminuye, lo que implica que el ala pierde capacidad para generar sustentación en condiciones críticas. Esta degradación aerodinámica también provoca un aumento en la velocidad de pérdida (stall speed), es decir, la aeronave entra en pérdida a velocidades más altas de lo habitual, comprometiendo la seguridad del vuelo y exigiendo mayor atención por parte del piloto en condiciones de formación de hielo.



Figura 2 Formación de hielo en el perfil alar (Carmona, 2009).

4.c.1 - Formación de hielo sobre el borde de ataque del perfil

La sustentación actúa como una fuerza aerodinámica dirigida hacia arriba que contrarresta el peso del avión; su eficacia aumenta con la velocidad de vuelo (Figura 3). La formación de hielo sobre las superficies alares produce dos efectos principales que degradan el rendimiento: un incremento de la masa adsorbida y una alteración de

la geometría del perfil. El aumento de masa eleva la carga alar efectiva y reduce la relación sustentación/peso; la modificación geométrica introduce rugosidades y protuberancias que perturban la capa límite y aumentan significativamente la resistencia aerodinámica, con la consiguiente pérdida de eficiencia a una velocidad dada.



Estas alteraciones provocan una reducción del coeficiente de sustentación máximo ($C_{L_{máx}}$), lo que desplaza hacia valores superiores la velocidad crítica de pérdida (stall speed). En la práctica, la aeronave

alcanza con mayor facilidad condiciones de pérdida, es decir, situaciones en las que el flujo aerodinámico se separa del ala y la sustentación disponible deja de ser suficiente para mantener el vuelo controlado. Además, el engelamiento modifica las características de maniobrabilidad y la respuesta de los mandos: aun cuando el avión esté aparentemente compensado para el despegue y el estabilizador se encuentre en la posición prescrita, la acumulación de hielo puede inducir comportamientos asimétricos o tendencias longitudinales anómalas, como una tendencia inesperada a levantar la nariz, que comprometen la estabilidad y la seguridad operativa.

4.c.2 - Tirabuzón Plano

Un tirabuzón plano es una pérdida aerodinámica en la que la aeronave entra en una rotación alrededor del eje longitudinal mientras describe una trayectoria descendente casi horizontal; se caracteriza por una alta tasa de rotación, una velocidad vertical de descenso significativa y una reducción drástica de la capacidad

de control y de recuperación. Se origina cuando la sustentación se pierde de manera asimétrica entre ambas alas y los controles de mando pierden eficacia, de modo que la aeronave entra en una rotación pronunciada sin conseguir restablecer un flujo aerodinámico ordenado sobre las superficies portantes.

La formación de hielo sobre las superficies alares altera profundamente las características del perfil alar. La acumulación de hielo en el borde de ataque y sobre la extradós e intradós introduce rugosidades y modifica la geometría del perfil, perturbando la capa límite y promoviendo la transición prematura de flujo laminar a flujo turbulento. Estas modificaciones provocan una disminución apreciable del coeficiente de sustentación máximo ($C_{L_{máx}}$) y un incremento de la resistencia parásita, lo que reduce la eficiencia aerodinámica y eleva la velocidad de pérdida (V_s). El aumento de masa por la acumulación de hielo desplaza además el centro de gravedad y puede reducir la maniobrabilidad.

Cuando el hielo se acumula de forma desigual entre las alas o sobre las superficies de control, aparece una pérdida asimétrica de sustentación que genera un momento de guiñada y un alabeo no compensados. La eficacia de los mandos se ve disminuida por la obstrucción, rigidez o alteración de su movimiento, lo que reduce la autoridad de control disponible para contrarrestar la asimetría. Bajo estas condiciones, el flujo aerodinámico puede separarse de manera irregular y localizada, amplificando la inestabilidad y dificultando la recuperación.

En aeronaves de diseño convencional esta cadena de efectos puede culminar en la entrada a un tirabuzón plano: la asimetría de sustentación induce una rotación en torno al eje longitudinal mientras la configuración alterada del perfil disminuye el ángulo de ataque crítico recuperable y la capacidad de restablecer un flujo adherente.

La trayectoria resultante es descendente y próxima a la horizontal, con una tasa de rotación elevada y una recuperación que puede ser difícil o imposible sin condiciones y procedimientos específicos de entrenamiento y diseño.

5. Conclusiones

Durante este análisis hemos estudiado en profundidad los sistemas de protección contra el engelamiento del ATR 72-500, los fenómenos meteorológicos que lo provocan y sus efectos sobre la aerodinámica de la aeronave. A partir de la revisión técnica, meteorológica y operacional, se identificaron los sistemas anti-hielo, las condiciones atmosféricas más propensas al engelamiento y las consecuencias que este fenómeno tiene sobre la sustentación, el rendimiento y la seguridad en vuelo.

Al analizar los objetivos de este artículo, hemos encontrado los siguientes puntos, los cuales hemos considerado esenciales para un conocimiento completo de cada uno de los fenómenos y sus efectos. Desde el punto de vista meteorológico, el engelamiento se produce en presencia de gotas de agua superenfriadas, nieve húmeda, escarcha o cristales de hielo, especialmente en altitudes intermedias donde operan aeronaves turbohélice como el ATR 72-500. Las condiciones más críticas se presentan entre -10°C , en ambientes con alta humedad y nubes de desarrollo vertical, como se evidenció en el accidente del vuelo 2283. La presencia de SIGMETs activo 0°C s, sondeos atmosféricos y cartas de tiempo significativas, confirmaban un entorno propicio para hielo severo, lo que subraya la importancia de una correcta interpretación meteorológica por parte de la tripulación.

Desde la perspectiva de la aerodinámica, el engelamiento altera el perfil alar al generar rugosidades en su superficie, lo que provoca una disminución del C_L , un aumento de la resistencia parásita y un aumento de la velocidad de pérdida. Esto

afecta directamente la ecuación de sustentación $L=C_L \cdot q \cdot S$, ya que reduce la capacidad de la aeronave para mantenerse en vuelo estable. En el caso del avión accidentado, la acumulación de hielo en las alas y superficies de control llevó a una pérdida asimétrica y un tirabuzón plano, una condición aerodinámica difícil de recuperar, especialmente en aeronaves no certificadas para maniobras de tirabuzón.

En cuanto a los sistemas de protección, el ATR 72-500 dispone de botas neumáticas en el borde de ataque, resistencias eléctricas en las hélices, calefacción en sondas y parabrisas, y sistemas de climatización que dependen del correcto funcionamiento de los Packs. Sin embargo, estos sistemas presentan vulnerabilidades como fallas eléctricas, activación tardía, mantenimiento deficiente o condiciones meteorológicas que exceden su capacidad. El caso de VoePass evidenció múltiples fallas previas en el sistema de deshielo, una altitud limitada por inoperatividad de un pack, y una secuencia de alertas instrumentales que no fueron atendidas con la importancia necesaria.

Concluyendo con este análisis, hemos logrado identificar que el ATR 72-500 cuenta con sistemas diseñados para enfrentar el engelamiento, pero su eficacia depende de una operación rigurosa, un mantenimiento preventivo y una lectura precisa de las condiciones meteorológicas. El fenómeno del engelamiento no solo compromete la aerodinámica, sino que puede desencadenar fallas sistémicas y humanas si no se aborda con la seriedad que requiere. Con este estudio reafirmamos la importancia y la necesidad de integrar conocimientos técnicos, metodológicos y operacionales para garantizar la seguridad en vuelo bajo condiciones adversas.

6. Bibliografía

1. ATR 72-500 Pilot Handbook (s. f.). Sección de sistemas de deshielo y aire neumático. <https://studylib.net/doc/27361106/atr-72-500-pilot-handbook>
2. Limitaciones de operación ATR 72-600 (s. f.) (aplica también al 500 en varios sistemas comunes). Altitud máxima con *pack* o *bleed* inoperativo: FL170. <https://www.docsity.com/en/docs/atr-72-600-limitations-questions-and-answers/12037737>
3. ATR Aircraft. (2020). *ATR 72-500 flight crew operating manual (FCOM)*. ATR. https://www.atr-aircraft.com/wp-content/uploads/2020/07/180403_18t0887_cata_flight_crew_training_mars_2018_interactif_97-1.pdf
4. Organización de Aviación Civil Internacional. (2016). *Manual de formación de pilotos sobre factores humanos* (Doc 9683). OACI. <https://es.scribd.com/doc/40163919/DOC-9683-Factores-Humanos>
5. Fuerza Aérea Uruguaya. (s. f.). *Recomendación de seguridad: Fenómenos meteorológicos, engelamiento*. https://www.fau.mil.uy/uploads/archivos/file_d44516e88a.pdf
6. TMAS Aviación. (2022, 4 de julio; actualizado el 29 de diciembre de 2021). *Engelamiento y sistema antihielo de los aviones*. <https://www.tmas.es/blog/mecanica-de-aviones/engelamiento-sistema-antihielo-aviones/>
7. ATR. (2010). *Systems* [Manual de formación]. ATR Training & Flight Operations Services. https://drive.google.com/file/d/1Qt9k8jtJAECOjMoR6yQDzKLcDVUGuJOY/view?usp=drive_link

8. Academy, A. (2022, 29 noviembre). *Aircraft Ice: Different Types & How it Affects Your Flight*. Aviation Academy ICT. <https://aviationacademyict.com/aircraft-ice-different-types-how-it-affects-your-flight/>
9. CENIPA (2024, 6 de septiembre). *Reporte Intermediário (Interim Statement)*. Informações de ocorrência aeronáutica. Portal CENIPA - Informações da ocorrência aeronáutica
10. FonteSegura (s. f.). *O entendimento sobre o acidente com o ATR-72-500 da Voepass em Vinhedo ainda vai demorar*. ForumSegurança. <https://fontesegura.forumseguranca.org.br/o-entendimento-sobre-o-acidente-com-o-atr-72-500-da-voepass-em-vinhedo-ainda-vai-demorar/>
11. Wikipedia. (s. f.). *Voepass Flight 2283*. En Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Voepass_Flight_2283
12. Agência Brasil. (2024, agosto). *Governador do Paraná decreta luto oficial após acidente aéreo*. EBC – Agência Brasil. <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-08/governador-do-parana-decreta-luto-oficial-apos-acidente-aereo>
13. Schleicher, C. (2024, agosto). *Voepass ATR-72 crashes in Brazil: Investigating the causes of the ATR-72 accident*. Simple Flying. <https://simpleflying.com/voepass-atr-72-crashes-brazil/>
14. The Airline Pilots. (s. f.). *ATR cold weather operations* [Manual técnico en PDF]. <https://www.theairlinepilots.com/forumarchive/atr/atr-cold-weather-operations.pdf>
15. Golden Epaulettes. (s. f.). *ATR-72 performance limitations*. <https://goldenepaulettes.com/atr-72-performance-limitations>

16. CLA; The CLA Group. (s. f.). *When and how to replace ATR-42/72 de-ice boots*.
<https://cla.aero/when-and-how-to-replace-atr-42-72-de-ice-boots/>
17. SKYbrary. (s. f.). *ATR-72/42 de-ice boots operations*.
<https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4452.pdf>
18. Federal Aviation Administration. (2004). *NASDAC review of NTSB weather-related accidents*. U.S. Department of Transportation.
<https://trid.trb.org/View/860295>
19. Carmona, A. I. (2009). *Aerodinámica y actuaciones del avión* (10.^a ed., actualizada). Editorial Paraninfo.