

El engelamiento

La formación de hielo sobre la superficie de las aeronaves recibe el nombre de engelamiento y es la principal causa de siniestralidad aérea en el mundo, por encima de la turbulencia en sus diferentes variantes. Las avionetas son especialmente vulnerables a la acumulación de hielo en sus fuselajes, lo que exige a sus pilotos conocer las características del fenómeno, su tipología y cuáles son las condiciones favorables para su formación, con el fin de evitarlo o al menos de impedir que se convierta en algo peligroso para la seguridad del vuelo.

Texto: José Miguel Viñas



Para que pueda producirse engelamiento, la aeronave obligatoriamente ha de atravesar una zona de la atmósfera en que haya gotas o gotitas de agua subfundida. Dichas condiciones se dan en el interior de las nubes o en las cortinas de lluvia, siempre y cuando la temperatura sea inferior a 0 °C. Las gotas y gotitas de agua presentes en el aire no se congelan a pesar de que la temperatura alcance valores negativos, pero en tales circunstancias dichos meteoros pasan a estar en estado de subfusión. Las moléculas de

esa agua superenfriada se reorganizan de tal forma que un ligero aumento de presión provoca su transformación inmediata en hielo, al crearse la estructura cristalina hexagonal que caracteriza al estado sólido del agua.

Cuando una aeronave atraviesa una nube constituida por gotitas engelantes, cualquiera de las gotitas que impactan contra ella se convierte de inmediato en hielo, quedando éste adherido a la estructura del avión. Los bordes de ataque son las zonas donde se producen las mayores acumulaciones. En



**Izquierda**

Lámina de hielo descascarillada en el borde de ataque de un avión ligero.



función del tamaño que tengan las gotitas que constituyen las nubes, el rango de temperaturas en que pueden mantenerse en estado de subfusión es mayor o menor. Las de menor tamaño son capaces de mantener su condición de líquido hasta temperaturas del orden de los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, si bien el engelamiento más peligroso es aquel que tiene lugar entre 0 y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aunque prácticamente a cualquier altitud de vuelo pueden darse condiciones de engelamiento, aproximadamente la mitad de los episodios tienen

lugar en baja cota, entre los 5.000 y los 13.000 pies, viéndose mayoritariamente afectadas las avionetas.

Entre los factores que influyen en la formación de hielo sobre una aeronave en vuelo, podemos distinguir entre los de tipo meteorológico y los de tipo aerodinámico. Entre los primeros tendríamos, por un lado, la cantidad de gotas y gotitas de agua subfundida presentes en el aire, pues lógicamente cuantas más tengamos, más hielo podrá

acumularse en nuestro avión. Para concentraciones comprendidas entre $0,5$ y 1 g/m^3 , el engelamiento será potencialmente peligroso. También influye la temperatura del aire, siendo el rango más crítico el que antes hemos apuntado, y, por último, la distribución por tamaños de las gotitas de nube. Con diámetros superiores a las 10 micras, la cantidad acumulada de hielo puede llegar a ser importante en poco tiempo.

En cuanto a los factores aerodinámicos, tendríamos, en 

Foto principal

Las tormentas de nieve pueden inmovilizar al tráfico comercial. De hecho, lo hacen frecuentemente. Foto: Archivo Key Spain.

En la otra página

Hielo firmemente adherido al morro y a la cabina de una avioneta. Fuente: Aviation Education Multimedia Library.

Derecha

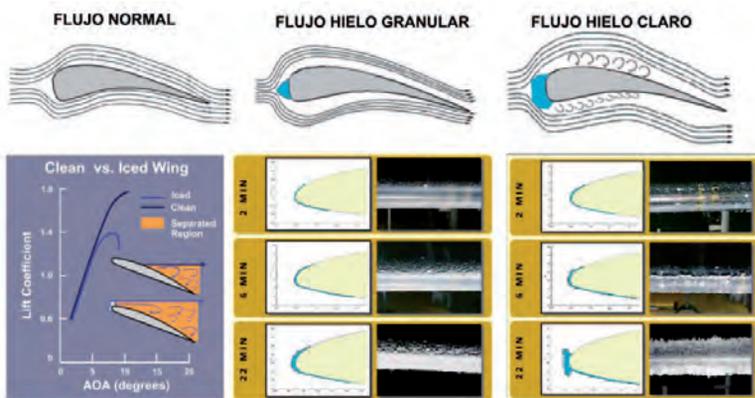
Esquemas y fotografías de la acumulación de hielo granular y claro en el perfil de ataque de un ala bajo diferentes tiempos de exposición (2, 6 y 22 minutos). En la gráfica de la izquierda aparecen representados los coeficientes de empuje ascensional en función de la temperatura para un ala libre de hielo (curva azul marino) y para otra engelada (curva azul claro).

primer lugar, la eficiencia con la que la aeronave va captando a su paso las gotas y gotitas de agua subfundida, lo que depende del tipo de perfil. También resulta determinante la velocidad de la aeronave, de manera que cuanto más rápido atraviesa una zona crítica, acumulará hielo a un mayor ritmo, pero durante menos tiempo. El último factor a tener en cuenta es la temperatura del fuselaje. Sobre él se produce un calentamiento cinemático, fruto de la fricción con el aire, siendo mayor en aire claro que en nube.

La progresiva acumulación de hielo generada por el engelamiento provoca una mayor resistencia aerodinámica, aparte del mayor peso que debe soportar la aeronave, lo que se traduce en una menor sustentación. Estos factores provocan a su vez una disminución del rendimiento del motor o motores, aparte de los errores instrumentales (como, por ejemplo, las lecturas falsas del altímetro como consecuencia de la obturación parcial por hielo del tubo pitot), las interferencias de radio (al verse afectada también la antena), las dificultades de control y, en los casos más críticos, las vibraciones, lo que causa una fatiga estructural muy peligrosa.

Podemos distinguir entre 5 tipos de hielo que, en un momento dado, puede acumularse sobre una aeronave en vuelo. Los enumeraremos a continuación, comentando las cosas más importantes para el piloto de cada uno de ellos:

1) Hielo granular (rime ice): Es opaco, blanco y presenta una textura granular. Es un hielo poroso y ligero, que debido a su baja adherencia es fácil de desprender. Al piloto le bastará con buscar una zona de vuelo



donde la temperatura del aire sea ligeramente superior a los 0 °C para deshacerse de él. El hielo granular está provocado por gotitas de nube de pequeños diámetros, asociadas principalmente a nubes estratiformes, y puede producirse hasta temperaturas muy bajas, de entre -15 y -25 °C (rango principal). La exposición prolongada bajo esas condiciones es lo que puede convertirlo en un factor de riesgo.

2) Hielo claro o vítreo (clear ice): Es transparente, cristalino y de mucha mayor densidad que el hielo granular. En este caso se desprende con dificultad, quedando firmemente adherido a los bordes de ataque de las aeronaves, lo que lo convierte en el tipo de engelamiento más peligroso. Este tipo de hielo es generado por gotas grandes superenfriadas, lo que habitualmente encuentra el piloto al penetrar en nubes de tipo convectivo, con gran contenido de agua y a unas temperaturas no excesivamente bajas (entre 0 y -10 °C).

3) Lluvia helada: El hielo que es capaz de generar es similar al claro y tiene lugar al atravesar una cortina de lluvia en la que sus gotas son de agua

subfundida, lo que ocurre cuando dicha cortina atraviesa en su caída una zona donde existe una inversión térmica y la temperatura desciende con respecto a la de un nivel superior de aire más caliente, quedando situada por debajo de los 0 °C. La lluvia helada puede resultar también muy peligrosa en un aeropuerto, debido a la formación de una lámina de hielo muy endurecido y resbaladizo sobre las pistas, lo que puede llegar a obligar a la suspensión temporal de las operaciones.

4) Aguanieve: Mientras que la nieve no se adhiere al fuselaje de las aeronaves, siempre y cuando esté seco, cuando la nieve está húmeda (lo que se conoce como aguanieve), al estar constituida por una mezcla de cristales de hielo y agua subfundida, sí que es engelante. La formación de hielo procedente del aguanieve tiene lugar en el entorno de la isocero (isoterma de 0 °C).

5) Escarcha: Aunque al principio del artículo se ha comentado que para que se produzca engelamiento el avión, necesariamente, ha de volar dentro de una nube o atravesar una cortina de lluvia, siempre y cuando

Derecha

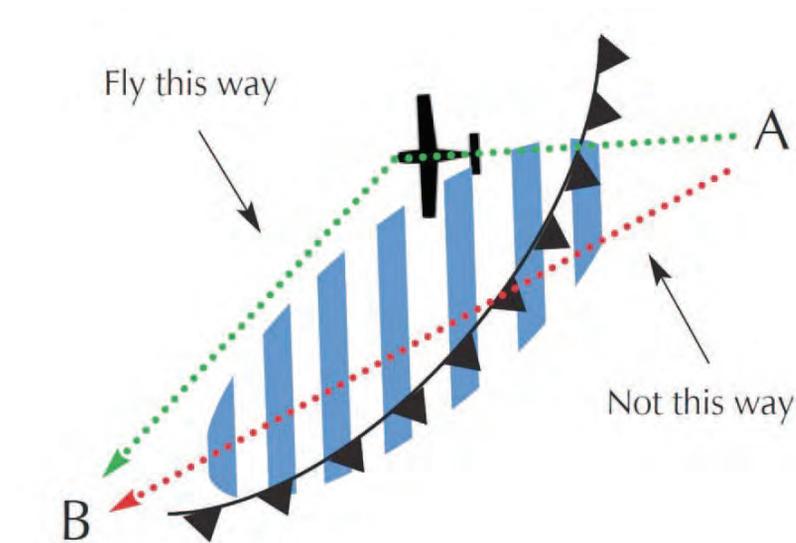
Operación aeroportuaria de deshielo en un avión de las líneas aéreas de Croacia.



se den las circunstancias favorables para ello, lo cierto es que también puede formarse hielo sobre el fuselaje volando en aire claro. Ello ocurre a veces en los aviones comerciales, cuando descienden rápidamente desde la parte alta de la troposfera (donde el aire está muy seco y la temperatura es muy baja) y atraviesan una capa de aire muy húmedo en un nivel atmosférico próximo al suelo, de manera que el vapor de agua contenido en él, al entrar en contacto con la superficie muy fría del avión, se congela de inmediato como consecuencia de una sublimación inversa (paso de vapor a sólido). La formación de escarcha ocurre también determinadas noches, principalmente del invierno, cuando el avión queda estacionado al raso, lo que puede llegar a bloquear algún elemento. Este tipo de engelamiento no es peligroso en vuelo.

En los mapas de tiempo significativo previsto, aparecen indicadas las zonas donde se espera engelamiento moderado o fuerte, lo que permite al piloto planificar adecuadamente su vuelo. En el caso del engelamiento moderado, la razón de engelamiento (cantidad de hielo depositada sobre la aeronave por unidad de tiempo) oscila entre los 5 y los 50 mm en 5 minutos, enturbiándose con rapidez los cristales de la cabina y siendo necesaria la activación de los dispositivos antihielo. Cuando el engelamiento es fuerte, la situación se torna peligrosa y hay que tratar de abandonar cuando antes ese nivel de vuelo. Bajo tales circunstancias, se acumula hielo a un ritmo superior a los 50 mm en 5 minutos, lo que en muy poco tiempo da lugar a una gruesa costra helada. El avión puede llegar a sufrir una importante pérdida de velocidad, como consecuencia de la disminución de la potencia de los motores, aparte de verse sometido a fuertes vibraciones y de fallar los sistemas de comunicaciones.

Aunque en el interior de las nubes de tipo convectivo, principalmente Cu congestus (cúmulos de gran desarrollo vertical, cuyo aspecto se asemeja bastante a las coliflores) y cumulonimbus (Cb) (nubes de tormenta), es donde puede esperarse un engelamiento más fuerte y peligroso, en ocasiones el vuelo prolongado en el interior de un nimbostratus (Nb) también puede provocar una acumulación importante de hielo, especialmente en las zonas donde esa nube gris que deja lluvia y nieve "choca" contra una montaña, en cuya ladera de barlovento el crecimiento de las



gotitas y los procesos de precipitación se ven favorecidos. Por otro lado, para atravesar los frentes hay que tratar de evitar las zonas donde potencialmente puede producirse el engelamiento. En el caso del frente frío no conviene volar demasiado tiempo en el entorno del propio frente, mientras que en el cálido, para cruzarlo deberemos elegir el nivel adecuado, evitando volar en el rango de temperaturas peligroso.

Existen dos tipos de defensas antihielo, cuya aplicación ayuda a reducir el engelamiento, evitándolo por completo en algunos casos. Por un lado, tendríamos los medios anticongelantes, cuya misión es impedir que se llegue a formar el hielo aunque se den las circunstancias favorables para ello, y por otro los descongelantes, que actúan sobre el hielo que ya se ha formado. Entre estos últimos podemos distinguir entre medios mecánicos y térmicos. Los mecánicos consisten en unas cámaras de aire

elásticas situadas en los bordes de ataque de las alas que el piloto puede inflar y desinflar a voluntad, lo que resquebraja la costra de hielo que pueda ir produciéndose en vuelo. Los medios térmicos permiten calentar las zonas más sensibles a la formación de hielo. Dicho calentamiento puede conseguirse o bien mediante unas resistencias eléctricas que calientan unas fajas situadas en diferentes zonas del fuselaje, o bien mediante la inyección, a través de un circuito interno, de parte de los gases calientes que expulsan los motores, lo que conlleva una pérdida de potencia. ■

Para aclarar cualquier duda meteorológica que tengas y si quieres ver también publicadas en la revista tus fotografías de los cielos y de los fenómenos meteorológicos captados en tus travesías, puedes ponerte en contacto con nosotros a través del correo electrónico: **info@divulgameteo.es**

Izquierda

Travesía correcta (línea de puntos verdes) e incorrecta (línea de puntos rojos) para atravesar un frente frío evitando al máximo el riesgo de engelamiento.

Junto a estas líneas

Reducción del hielo depositado en el borde del ala de un avión, como consecuencia de la acción de las cámaras de aire expansibles allí dispuestas. De no haber activado el piloto ese dispositivo, los efectos del engelamiento en dicho ala hubieran sido considerablemente mayores. Fuente: Aviation Education Multimedia Library.