



# ENGELAMIENTO

## Un enemigo oculto entre las nubes

### Introducción

Como es de amplio conocimiento en el ámbito aeronáutico, se conoce con el nombre de engelamiento, al congelamiento de las gotas de agua que impactan sobre la estructura de un avión en vuelo (borde de ataque de los perfiles alares, hélices, antenas, etc.) o que ingresan dentro de alguno de sus componentes que tienen contacto con el aire exterior (tubo Pitot, carburador, etc.). Puede también considerarse como un caso especial la escarcha, la cual se forma cuando el avión está en tierra, durante noches frías y con un alto contenido atmosférico de vapor de agua en capas bajas.

Se trata de un fenómeno que no solo afecta seriamente las características aerodinámicas de la aeronave, sino también el funcionamiento de sus componentes y en ocasiones debido a su intensidad puede afectar indirectamente a las comunicaciones al producir, por carga de acumulación, rotura de las antenas.

Es necesario para evitar el riesgo de su formación conocer su mecanismo de acción y de este modo minimizar sus efectos y conocer los procedimientos a seguir en el caso de que se comiencen a manifestar indicios de su presencia.



## **Características de la formación de hielo**

Se denomina hielo al proceso de solidificación del agua cuando su temperatura desciende a cierto nivel. Desde el punto de vista meteorológico se presenta de diversas formas las cuales son la nieve, el granizo y la escarcha. Si bien su formación en condiciones de atmósfera estandar ocurre a los 0° Centígrados en ocasiones, al no observarse estas, las gotas de agua pueden mantenerse en estado líquido hasta con temperaturas cercanas a los 6° Centígrados bajo cero. A este estado se lo conoce con el nombre de agua sobreenfriada.

## **Condiciones necesarias para la formación de cristales de hielo**

Para el proceso de formación de los cristales de hielo a partir del vapor de agua, es necesario contar con la presencia de núcleos de congelación, así como son necesarios núcleos de condensación para la formación de las gotas de agua.

Se han desarrollado muchas teorías para explicar el fenómeno del nacimiento de esos cristales, pero ninguna de ellas ha sido aceptada totalmente por los meteorólogos.

Varias son las partículas que actúan como núcleos de congelación entre las cuales podemos citar a ciertas arcillas, polvo y arenilla de los desiertos. Ha sido demostrado a través de investigaciones que entre 10° y 40° C bajo cero, las nubes están compuestas por una mezcla de cristales de hielo y gotas de agua las



cuales favorecen el crecimiento de los primeros y que por debajo de  $40^{\circ}$  C bajo cero, sólo se presentan en ellas cristales de hielo.

A modo informativo existen numerosos formas de cristales de hielo, dependiendo para su formación la humedad y, fundamentalmente la temperatura del aire donde se forman. Así de esta manera pueden distinguirse los siguientes:

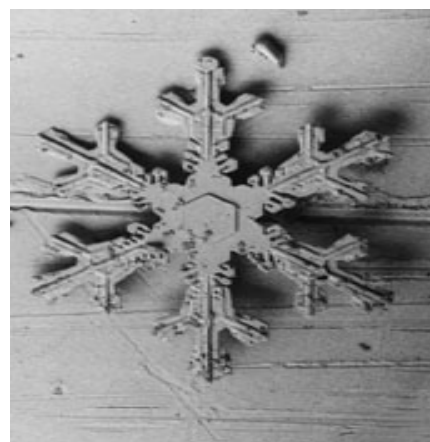
Agujas presentes en nubes bajas, con temperaturas de unos  $-5^{\circ}$  C.

Placas hexagonales presentes en nubes situadas a altitudes bajas y medias con temperaturas entre  $10^{\circ}$  y  $20^{\circ}$  C bajo cero.

Prismas hexagonales huecos se los encuentra en las nubes altas con bajas temperaturas.

Cristales dendríticos característicos por su forma de estrella hexagonal característicos de las nubes bajas, con alto contenido de humedad y temperaturas cercanas a los  $15^{\circ}$  C. bajo cero.

Fig 1: Microfotografía de un cristal de hielo.



## **Condiciones para la formación de hielo en las aeronaves**

Volviendo al tema original, es necesario reunir ciertas condiciones tales como:

Que el avión vuele dentro de capas nubosas o a través de lluvia; que la temperatura de las gotas este por debajo  $0^{\circ}$  C al ponerse en contacto con el avión.

Como se había citado en puntos anteriores en ocasiones el agua se halla en estado de sobreenfriamiento, lo que ocasiona que al chocar contra las partes del avión se congela.

Las mejores condiciones para la formación de engelamiento se generan, además de lo considerado anteriormente, cuando la temperatura de la masa de aire está entre los  $15^{\circ}/20^{\circ}$  C bajo cero y los  $0^{\circ}$  C, ya que a menores temperaturas la nube está compuesta por cristales de hielo los cuales presentan una muy baja adherencia en las partes del avión.

Otros factores que son importantes a tener en cuenta son:

### **Temperatura de la gota (sobrenfriada).**

**El diámetro de la gota.** Incide como se describirá más adelante en el tipo de hielo que se forme.

**El contenido de agua líquida disponible.** Nos dará una idea de la velocidad de formación.

**La temperatura de superficies y velocidad de la aeronave.** Durante el vuelo y por efecto del rozamiento con el aire, la célula del avión sufre lo que se denomina calentamiento cinético, el cual influye en la formación de hielo.





**La eficiencia de la aeronave para acumular hielo.** Es una característica estructural del avión, ya que de acuerdo a la rugosidad de su superficie y/o su forma, tiende a la formación o no de engelamiento.

### **Clasificación de los tipos de hielo que se presentan, según su formación:**

Según sea el tipo de gotas de agua que intervengan en su formación, pueden distinguirse diversos tipos de hielo, detallándose a continuación los principales:

#### **Hielo cristalino o claro (glaze)**

Se genera cuando después del impacto inicial la gota de agua, en general de gran tamaño, se escurre sobre la superficie de la aeronave congelándose gradualmente, formando una sólida capa de hielo, la cual se acrecienta con los sucesivos impactos de otras gotas. Se forma generalmente entre  $0^{\circ}$  y  $-10^{\circ}$  C, en nubes cumuliformes con gran contenido de vapor o en áreas de lluvia engelante. Se trata de un hielo transparente o translúcido con aspecto superficial vidrioso. Se forma rápidamente desde los bordes principales hacia atrás y resulta difícil de desprender. En ocasiones pueden también formarse con la combinación de cristales de hielo.

(Fig. 2)

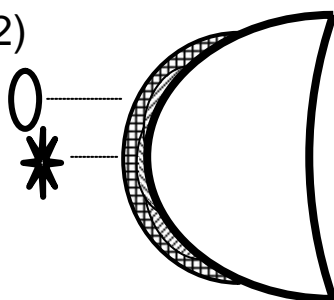
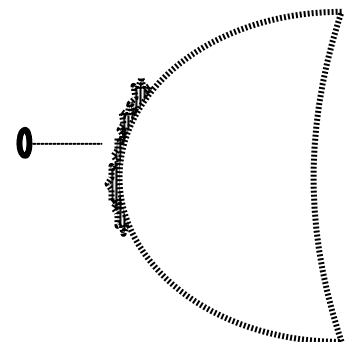
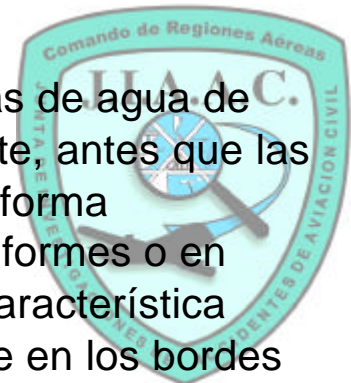


Fig 3: Proceso de formación del hielo claro  
Fig 4: Proceso de formación del hielo opaco





### **Hielo opaco (rime)**

Se genera cuando se produce el impacto con gotas de agua de pequeño diámetro y éstas se congelan rápidamente, antes que las mismas se escurran como en el caso anterior. Se forma generalmente entre  $-10^{\circ}$  y  $-20^{\circ}$  C, en nubes estratiformes o en áreas de lloviznas helada. Forma una superficie característica rugosa, blanca y opaca. Se deposita generalmente en los bordes delanteros de las alas y la superficie de la cola, conos de hélices, hélices, antenas, fuselaje y a veces en las cabezas de los remaches y otras partes salientes del avión en roce con la corriente del aire. No presenta gran adherencia y su formación en general es más lenta que la del hielo claro. (Fig.3)

### **Escarcha (frost)**

Tal como se mencionó anteriormente se forma cuando el avión está en tierra, durante noches muy frías y con un alto contenido atmosférico de vapor de agua en capas bajas. Posee mediana adherencia.

### **Cómo afecta la formación de hielo a las aeronaves**

No es el aumento de peso por acumulación de hielo el factor más importante cuando se observan condiciones de engelamiento, sino que este afecta en diversas maneras a las características aerodinámicas de las aeronaves y también a otros sistemas que componen a las mismas, dependiendo del tipo de hielo que se forme y del espesor del mismo. En general puede considerarse que los principales peligros para el desarrollo del vuelo, son los siguientes:

Aumento de resistencia aerodinámica. Pérdida de sustentación.

Pérdida de tracción en hélices.

Vibraciones.

Aumento de consumo.

Bloqueo de comandos.



Bloqueo de tren de aterrizaje retráctil

Reducción de visibilidad en cabina.

Inutilización de antenas.

Indicaciones erróneas en instrumental.



Daños estructurales por desprendimiento de hielo.

Si bien son enunciados por separado, debe aclararse que en general el rendimiento de la aeronave se ve afectado por el efecto de la combinación de los mismos. Como ejemplo de ello citaremos algunos casos particulares:

### **Formación de hielo en bordes de ataque de los perfiles alares**

Durante el vuelo entre capas nubosas o lluvia engelante, los bordes de ataque de las alas y el empenaje de cola, son superficies altamente susceptibles para la formación y acumulación de hielo. Esto afecta a la aeronave principalmente con el aumento de resistencia aerodinámica, la deformación del perfil alar, aumento del peso y en consecuencia esto se traduce en una disminución de la sustentación. En el caso específico de la deformación del perfil alar el hielo, dependiendo de su tipo, produce diversos factores que pueden resumirse como el desprendimiento de los filetes de viento de la superficie alar disminuyendo su poder de sustentación y, en casos de aviones de gran porte que poseen aletas direccionadoras de flujo, se puede observar una gran dificultad en la maniobrabilidad de los mismos. Pero hay que considerar como se mencionó anteriormente que todos estos inconvenientes están íntimamente relacionados con el tipo de hielo que se formó tal como puede ser apreciado en las figuras 5 a, b y c:

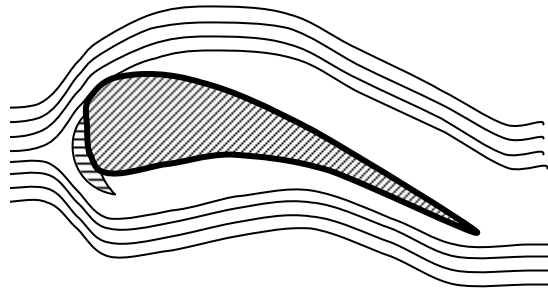


Fig 5 –a : Disposición de los filetes de viento en un perfil alar normal.

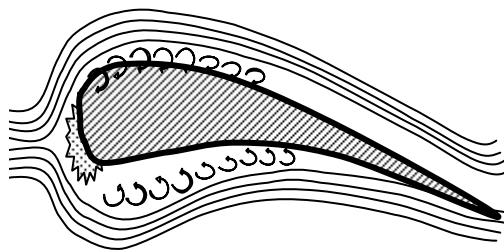


Fig 5 – b : Deformación de los filetes de viento en un perfil alar afectado con formación de hielo claro.

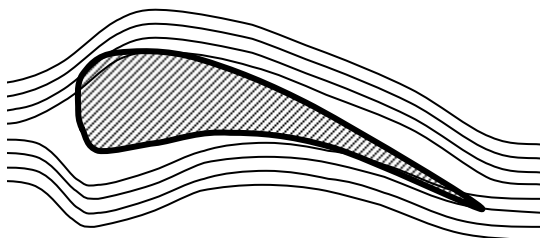


Fig 5 – c : Deformación de los filetes de viento en un perfil alar afectado con formación de hielo opaco.





## **Formación de hielo en hélices**

Al igual que las superficies alares, las hélices pueden ser también afectadas por la formación de hielo. En estos casos las mismas sufren una pérdida en su poder de propulsión con el agravante de que cuando aumenta el espesor del hielo y teniendo en cuenta que, por el efecto de la rotación, el mismo está sometido a la fuerza centrífuga generada, pueden ocasionarse desprendimientos parciales, afectando su balanceo y de esta forma originar fuertes vibraciones.

## **Formación de hielo en el carburador**

Este tipo de formación de hielo se origina habitualmente por factores distintos a los que causan la formación de hielo en el exterior de la aeronave. El enfriamiento que se produce en la boca del carburador como consecuencia del aumento de la velocidad del aire, de la disminución de presión provocada por el tubo Venturi y de la disminución de la temperatura producida por la vaporización del combustible, sumado a que el aire que ingresa lo hace cargado de gotas de agua dan origen a que estas últimas se congelen en la superficie interna del carburador disminuyendo su diámetro interno, afectando en consecuencia la cantidad de aire que ingresa variando las condiciones de la mezcla. Asimismo puede afectar trabando la mariposa que regula el paso de aire. En general este tipo de formación de hielo ocurre entre los 5 y 20 °C bajo cero pudiéndose formar en ocasiones hasta con temperaturas de 26 °C bajo cero. Una forma práctica de descubrir la formación de hielo en el carburador es inyectando aire caliente periódicamente, si no se observa variación en las RPM significa que no había hielo, si ocurre lo contrario (aumento de las RPM) existía y fue removido.



## **Formación de hielo en el tubo PITOT**

Un componente de fundamental importancia que sobresale de la célula de la aeronave es el tubo PITOT el cual puede sufrir, en el caso de formación de hielo, una disminución en su diámetro interno reduciendo la entrada de aire, causa por la cual en todos los instrumentos de vuelo que son parte del sistema estático puede ocurrir que sus lecturas no sean fiables y puede llevar indicaciones erróneas y hasta la pérdida por completo de la información en el puesto de pilotaje.

## **Formación de hielo en otras estructuras y componentes de la aeronave**

En general puede considerarse que cualquier parte que sobresale de la estructura de la aeronave y que presente un obstáculo para el pasaje de los filetes de aire, será proclive a la formación de hielo. Tal es el caso por ejemplo de los conos de las hélices, parabrisas, remaches, antenas, etc. En este último caso, la acumulación de hielo en las mismas ocasionan fuertes vibraciones y en ocasiones, sumando el efecto producido por el peso del hielo acumulado, pueden producir su rotura.



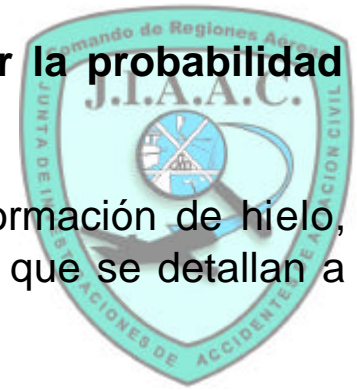
## **Mitigación de los efectos producidos por el engelamiento**

Queda sumamente demostrado que la formación de hielo dificulta el manejo y control de la aeronave. Al tratarse de un fenómeno que en ocasiones se producen tan rápidamente que no hay tiempo suficiente para evitar las zonas de formación, es necesario contar con los medios físicos y con los conocimientos teóricos necesarios con los cuales afrontar este tipo de situaciones.

En general los aviones están equipados por una serie de sistemas que combaten la formación de hielo, los que hay que conocer y saber exactamente en que momento usarlos, ya que de no ser así, pueden llegar a no cumplir con su función. Este es el caso de los deshieladores neumáticos de las alas, diversos calentadores de las superficies expuestas ya sea por circulación de aire caliente o por procedimientos eléctricos entre otros.

En el caso particular de los deshieladores neumáticos que algunas aeronaves poseen en el borde de ataque de las alas y en el de la superficie de la cola, consisten en tubos de goma flexible inflables. Cuando son activados se inflan y desinflan, rompiendo el hielo adherido. Este sistema posee una desventaja que es la de que al no ser utilizados en el momento apropiado pueden generar una cámara de aire entre su posición de expansión máxima y la superficie del hielo a partir de la cual la acumulación del mismo continúa con su crecimiento, haciendo imposible su desprendimiento.

## **Dónde debe evitarse volar para disminuir la probabilidad de Englamiento**



En general, para mitigar los riesgos de la formación de hielo, deben ser evitadas principalmente las áreas que se detallan a continuación:

Zonas Frontales.

Nubosidad cumuliforme de gran desarrollo vertical.

Nubosidad cumuliforme densa.

Zonas de precipitación ubicadas en los distintos tipos de frentes.

Nieblas densas.

Nubes estratiformes densas con gran contenido de gotas de agua (ej. Nimbostratos)

En terrenos montañosos, evitar la nube de “capuchón” (se forma del lado de barlovento).

### **Precauciones a tomar cuando se deba realizar un vuelo con condiciones atmosféricas de baja temperatura**

Se transcribe a continuación del Manual de Meteorología para Aviadores Militares FM 130 de la Aviation Training Brigade – Fort Rucker – Alabama – USA, una lista de verificación que ayudará a prevenir los riesgos de las operaciones aéreas cuando las mismas se desarrollen en condiciones de bajas temperaturas:

Verifique el estado del tiempo cuidadosamente, interrogué al aviador que acaba de completar un vuelo.



Verifique los avisos para los aviadores (NOTAMs).

Retire toda escarcha antes del vuelo.

Verifique si existe alguna restricción de movimiento en los mandos.

Permanezca en vuelo estacionario o ruede el avión lentamente.

Utilice los frenos con cuidado.

Después de atravesar una zona con niebla densa o lluvia, verifique la presencia de hielo en los bordes de ataque de las alas o en el cono de la hélice o en el área de la estela turbulenta del rotor.

Utilice lentes de sol si el resplandor es intenso.

En aeronaves de ala fija, de ser posible, evite el despegue cuando existan las condiciones de aguanieve o nieve húmeda y evite los bancos de niebla. En los rotoplanos se deberá mantener un vuelo estacionario elevado sobre este tipo de superficie para reducir la cantidad de aguanieve, nieve o nieve húmeda que se elevará sobre la aeronave.

Utilice el calentamiento del Tubo PITOT cuando se encuentre volando en nieve, nubes, ect. o en zonas donde se presume que existen condiciones de formación de hielo.

Cuando vuele en condiciones de lluvia engelante, ascienda a las nubes donde las temperaturas se encuentren sobre el punto de congelación (a menos que se sepa que la temperatura a una menor altura es lo suficientemente elevada como para prevenir la formación de hielo).







## **Conclusiones**

El engelamiento en las aeronaves representa un serio riesgo para las operaciones aéreas y si bien en realidad se produce con relativamente baja frecuencia, hay que tener en cuenta que observando algunas reglas básicas enunciadas en el presente artículo, puede ser evitado o por lo menos pueden ser minimizados sus efectos.

La habilidad del piloto y su conocimiento de los procedimientos establecidos en el manual de operación de la aeronave, son elementos que resultan imprescindibles para evitar la formación de hielo. Las maniobras, virajes, ascensos o aterrizajes, deberán ser realizadas manteniendo un amplio margen de velocidad para contrarrestar la pérdida de altura originada por el hielo.

Sin embargo, y no está demás aclarar, que la mejor manera de evitar la formación de hielo es la prevención. A la hora de la planificación del vuelo el piloto debe asesorarse minuciosamente, y de ser posible personalmente, con el Pronosticador de la Oficina Meteorológica del Aeródromo, acerca de las probables zonas de formación de hielo, entre otras cosas y también de interiorizarse de los AIREPs emitidos por otros pilotos en vuelo.

Normalmente un piloto experimentado que utilice todos los datos meteorológicos aeronáuticos disponibles y actualizados, su conocimientos del terreno y los de su aeronave, puede evitar los riesgos producidos por el engelamiento. Lo que hay que tratar de evitar es el exceso de esta confianza, la cual da origen a erróneas posturas que pueden llegar a convertirse en un eslabón más de la cadena de falencias que desembocan en un accidente aéreo.

**Capitán Gustavo Alberto FLORES**  
*Jefe Departamento Meteorología Aeronáutica  
de la DGSMN*