

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. E.T.S.I.D. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y DE MATERIALES.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Análisis de materiales antiincendios en aplicaciones aeronáuticas.

---

Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería  
Aeroespacial.

**Autora: Clara Argerich Martín**

**Tutor: David Busquets Mataix**

**julio de 2014**



## **Abstract/Resumen**

*This paper is about the importance of the use of proper materials in case of an unexpected fire during a flight. Firstly, a background of accidents involving fire and their consequences will be provided, as well as a statistical study of the surviving chances. Secondly, the current materials used on aerospace engineering will be reviewed along with their thermal properties. It will be presented a relatively new material, Aluminum Foam. Finally, a comparison between aluminum and aluminum foam will be made in the laboratory in order to conclude that the last material is the better choice for fire environment.*

Esta memoria trata sobre la importancia del uso de materiales adecuados tanto para prevenir como para atajar incendios en aeronaves. En primer lugar se proporciona información sobre el fondo histórico de incendios en aeronaves y sus consecuencias al tiempo que se realiza un estudio estadístico para conocer las probabilidades de supervivencia. La siguiente parte de la memoria es un resumen sobre los materiales aeronáuticos más utilizados en la actualidad. Se presenta la Espuma de aluminio, un material relativamente nuevo con propiedades térmicas interesantes. La última parte del trabajo se centra en la recogida de datos de los experimentos llevados a cabo en el laboratorio. Se realiza una comparación entre aluminio y espuma de aluminio para comprobar las buenas propiedades de esta última frente a incendios.



## Contenido

Abstract/Resumen .....	2
1. Introducción .....	6
2. Objetivos .....	9
3. Tipos de fuego en una aeronave.....	11
3.1. Fuego oculto.....	11
3.2. Fuego en cabina .....	13
3.3. Fuego en motor o en la APU (Auxiliar Power Unit).....	14
3.4. Estudio estadístico del riesgo de los fuegos en vuelo.....	16
3.5. Fuego post-accidente .....	19
4. Materiales aeronáuticos. ....	22
4.2. Acero. ....	22
4.3. Titanio.....	25
4.4. Aluminio. ....	26
4.5. Espuma de Aluminio.....	29
4.5. Materiales compuestos y otros materiales de uso en cabina.....	31
4.6. Comparación de los materiales.....	32
5. Propiedades térmicas y caracterización en laboratorio.....	34
5.1. Flujo de calor a través de un mamparo.....	34
5.1.1. Introducción al experimento y montaje.....	34
5.1.2. Cálculo del flujo de calor. ....	37
5.1.3. Resultados. ....	40
5.1.4. Conclusiones.....	45
5.2. Exposición a llama y ensayo de flexión. ....	46
5.2.1. Exposición a llama. Introducción y montaje. ....	46
5.2.2. Exposición a llama. Resultados y conclusiones. ....	48
5.2.3. Ensayo de flexión. Introducción y montaje.....	51
5.2.4. Ensayo de flexión. Resultados y conclusiones.....	55
6.Conclusiones. ....	64
7. Glosario. ....	66
8.Bibliografía. ....	68
1. Ordenanzas generales de la seguridad e higiene en el trabajo. ....	70
1.1. Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores. ....	71
1.2. Artículo 2: Seguridad estructural. ....	71

Julio 2014

1.3.	Artículo 3: Superficies y cubicación.....	72
1.4.	Artículo 4: Suelos, techos y paredes. ....	72
1.5.	Artículo 5: Disposiciones generales.....	72
1.6.	Artículo 6: Iluminación de emergencia. ....	73
1.7.	Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad. ....	73
1.8.	Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones. ....	74
1.9.	Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos. ....	74
1.10.	Artículo 10: Electricidad estática.....	75
1.11.	Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables.....	76
1.12.	Artículo 12: Prevención y extinción de incendios. ....	77
1.	Presupuesto. ....	80
10.	Anexo 1: Análisis estadístico de accidentes apartado 3.4. ....	84
10. 1.	Anexo 1: Resolución de la distribución de Weibull.....	86

# DOCUMENTO I: Memoria

## 1. Introducción

El mundo de la ingeniería aeronáutica es un sector con continuos avances tecnológicos cada año, con los que se pretende mejorar las cualidades de las aeronaves: sus actuaciones, velocidad, rango de alcance, carga de pago..., al tiempo que reducir el coste y cumplir con la normativa ambiental impuesta. La seguridad de los usuarios es un factor que se ha de tener en cuenta en todo tipo de vuelos, especialmente los comerciales porque, aun sin considerar ahora el valor de la vida, un avión seguro garantiza el éxito a la compañía que lo emplea. Si una aeronave presentase serios defectos en seguridad, los pasajeros dejarían de utilizarla, y esto podría suponer una pérdida de ingresos para las compañías que operasen vuelos con determinada aeronave.

En el mundo de la ingeniería aeronáutica existen muchos factores de riesgo que pueden poner en peligro la seguridad de los pasajeros, pilotos y/o miembros de la tripulación. El hecho de primar la seguridad ha conseguido que el transporte aéreo sea el medio de transporte más seguro en la actualidad. Si bien es cierto que los accidentes en aeronáutica suelen ser catastróficos, si estos son consecuencia de un choque de una aeronave, se desencadenan problemas que hacen decrecer el índice de supervivencia de los pasajeros. Estos problemas suelen ser incendios y la posterior propagación de las llamas a lo largo de todo el aparato. Es el caso del peor accidente de la historia de la aviación, el “Desastre de Tenerife”, en<sup>1</sup> 1977. Debido a problemas de visibilidad y a la desobediencia del capitán a la torre de control, dos Boeing 747 colisionaron en pista; los tanques llenos de combustibles explotaron y rápidamente las dos aeronaves se encontraron envueltas en llamas, acabando con la vida de casi todos los pasajeros y miembros de tripulación.

También el fuego a bordo es una causa de accidentes aéreos, como lamentablemente se ha demostrado a lo largo de la historia de la aviación: accidentes tales como el vuelo 111 de SwissAir y la tragedia de Königs fueron causados por un incendio a bordo. En el primer vuelo, un cable defectuoso recubierto con un material inadecuado desencadenó un incendio que fue acabando con los sistemas eléctricos del avión. Posteriormente se descubrió que muchos de los materiales del avión no cumplían los requisitos necesarios de inflamabilidad y propagación de llama. En la denominada tragedia de Königs un avión Ilyushin-62 tenía una fuga en el sistema de aire caliente por la que se escapaba aire a 300°C que debilitaba los materiales protectores de sistemas eléctricos. Esto condujo a un cortocircuito y la posterior propagación del fuego a toda la aeronave.

Además, no sólo las aeronaves de vuelo chárter sufren este tipo de accidentes, también lo padecen las aeronaves antiincendios cuya misión es apagar fuegos. Estas aeronaves, además

---

<sup>1</sup> Base de datos de accidentes de “*Aviation Safety*”.

Julio 2014

del riesgo de incendio que pueda tener cualquier avión, sufren una exposición directa al fuego que las convierte más vulnerables. Una pequeña fuga de combustible puede acabar en un fatal accidente, como ocurrió con un CL-215-1A10 en Grecia (1984) mientras trataba de extinguir un incendio forestal.

Así pues, queda claro que los incendios en una aeronave suponen un problema que pone en juego la seguridad de los usuarios. El objetivo de todos los constructores, ingenieros y empresarios del sector aeronáutico es minimizar los accidentes en aviación. Para ello se ha de trabajar en todos y cada uno de los aspectos técnicos que pueden poner en riesgo la vida de los pasajeros y/o tripulantes. Uno de estos aspectos es el fuego. El fuego en aeronaves puede deberse tanto a factores intrínsecos, como a factores extrínsecos. Para disminuir la mortalidad en accidentes con fuego es necesario utilizar materiales normalizados y un mantenimiento adecuado. Las medidas que pueden tomarse al respecto son activas o pasivas, es decir, pueden actuar directamente sobre la fuente de fuego apagándolo, como sería el caso de uso de extintores a bordo, o pueden ser medidas cuyo objetivo será retrasar la propagación de la llama o evitar la inflamación de las partes de la aeronave en contacto con la fuente. Este último es el caso de la utilización de materiales ignífugos o con una temperatura de inflamación muy elevada. El uso de estos materiales en los puntos específicos del aparato puede ser muy relevante a la hora de salvar vidas si se da un accidente. Es por eso que la investigación en materiales es un campo muy importante a la hora de mejorar las tecnologías actuales.

En cuanto a la naturaleza del fuego, este es un elemento cuya existencia depende de cuatro factores: el combustible, el comburente (oxígeno), la energía aportada y la reacción en cadena, tal y como se muestra en el “tetraedro del fuego”.

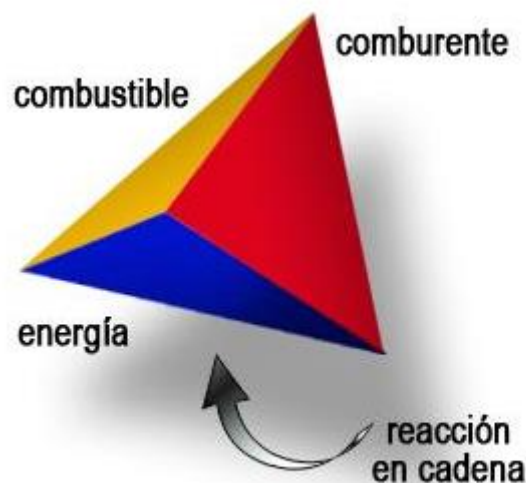


Ilustración 1-1. Tetraedro del fuego.

Para que la combustión se mantenga, el fuego generado debe a su vez generar suficiente calor para vaporizar más combustible, que vuelva a mezclarse con el oxígeno y se inflame, generando más calor, y repitiendo el proceso. Este es el fenómeno denominado reacción en



Julio 2014

cadena. Si uno de los cuatro factores del triángulo deja de existir, el fuego se apagará. Empleando materiales ignífugos dejaría de existir la parte “combustible” puesto que no habría nada que se pudiese quemar.

Conociendo la naturaleza del fuego y la ciencia de los materiales que pueden formar parte de una aeronave, pueden realizarse estudios que garanticen una seguridad determinada a la hora de volar y en cuanto a lo que incendios se refiere.

## 2. Objetivos

Los objetivos son conocer el riesgo de incendio de una aeronave de tipo comercial, los tipos de fuego que pueden tener lugar dentro de la misma y su peligrosidad, con el fin de poder realizar un estudio sobre los materiales que conforman una aeronave y su capacidad de resistir un posible fuego. Para ello se buscan materiales ignífugos o con una temperatura de ignición muy elevada y con elevada resistencia a altas temperaturas. Todas estas consideraciones han de tenerse en cuenta en toda la integridad de la aeronave. Todos los elementos de la aeronave han de ser resistentes al fuego. La parte del motor es de la más delicadas puesto que es el lugar en que se alcanzan las temperaturas más elevadas (temperaturas de combustión de alrededor de 2200K). También es muy relevante el material de los elementos de la cabina, asientos, moqueta, las paredes, incluso cualquier pintura de recubrimiento... Todos estos elementos han de ser capaces de evitar la propagación de un posible incendio en cabina.

Una vez realizado el estudio bibliográfico se procederá a realizar un estudio experimental centrado en el aluminio, un material muy utilizado en la Ingeniería Aeronáutica. Los motivos de su amplia utilización son los que le otorgan sus características. Posee una baja densidad comparada con casi cualquier otro metal, y se puede endurecer fácilmente por acritud o tratamiento térmico. Una de sus desventajas principales es que a altas temperaturas se reblandece. En una aeronave que sufre un incendio esto sería algo muy desfavorable ya que se perdería integridad estructural del fuselaje, circunstancia que terminaría con una pérdida de control de la aeronave. Por todo lo enunciado, el aluminio y sus aleaciones se utilizan mucho en la industria aeronáutica.

En las siguientes imágenes se muestra el porcentaje de aluminio utilizado en algunas aeronaves comunes como son el A380 y los Boeing 747 y 777.

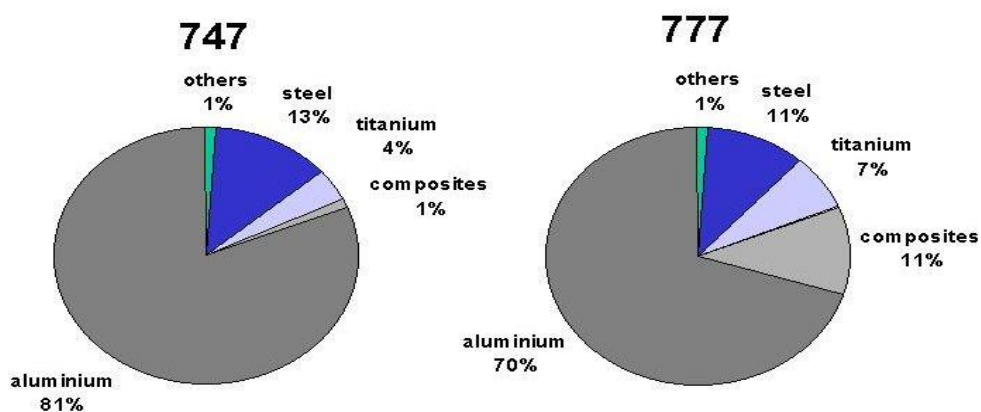


Ilustración 2-1: Distribución de los materiales del Boeing 747 y el Boeing 777.

Se comprueba gracias a estos gráficos tarta como en la Casa Boeing que el aluminio es un material muy empleado.

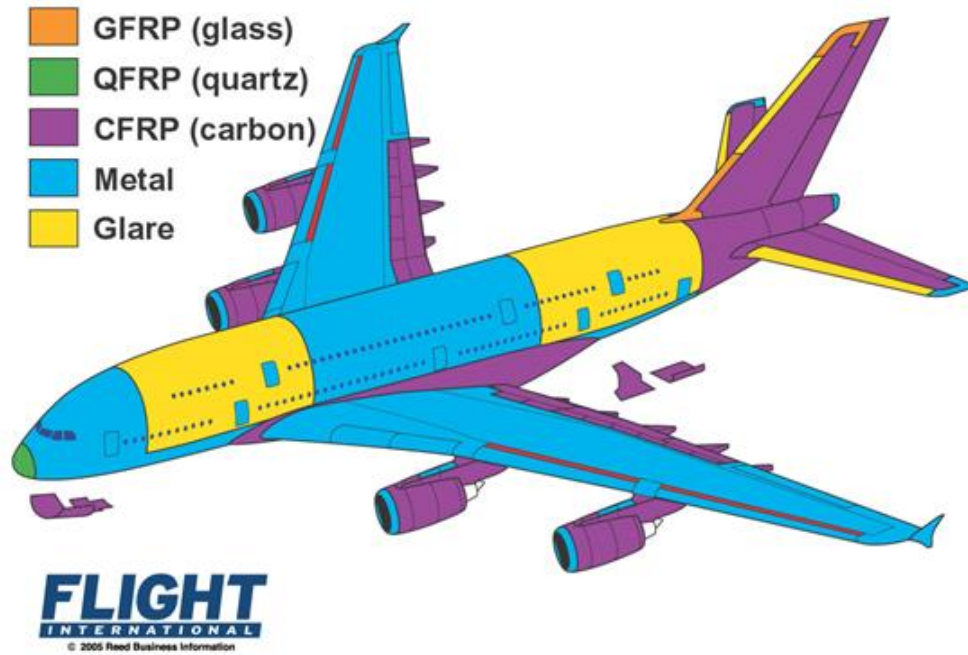


Ilustración 2-2: Distribución de los materiales que conforman el A-380

En el Airbus A-380 el aluminio está presente en un 61% de la estructura. Además, se utiliza “Glare”, un material compuesto hecho con capas de aluminio y fibra reforzada, lo que consigue una disminución de peso con respecto al uso exclusivo de aluminio.

El aluminio es un material clasificado como resistente al fuego, sin embargo sus propiedades frente al fuego pueden verse mejoradas si se utiliza espuma de aluminio. En el presente trabajo se realizará una comparación experimental de aluminio con espuma de aluminio con el fin de conocer las propiedades de ambos frente al fuego, su resistencia estructural y su densidad, que son las características más relevantes a la hora de construir una aeronave. Con este estudio se pretende averiguar si podría mejorarse la resistencia al fuego de una aeronave, así como reducir su peso utilizando espuma de aluminio en lugar de aleaciones de aluminio en algún lugar de la estructura.

### 3. Tipos de fuego en una aeronave.

Dentro de una aeronave pueden existir diversos tipos de fuego, generalmente clasificados por su origen, es decir, el lugar en que se generan. La clasificación se realiza de este modo puesto que dependiendo de la fuente se ha de actuar de una forma u otra. Por ejemplo, si el incendio tiene lugar en un motor el objetivo es intentar aterrizar en cuanto antes, mientras que si tiene lugar en cabina, la tripulación habrá de hacer todo lo posible por extinguirlo. Dependiendo del tipo de fuego se tendrá un “tiempo antes de que no pueda haber supervivientes”, por lo que un objetivo principal será ampliar ese tiempo lo máximo posible. Los tipos de fuego se clasifican en fuego en cabina, fuego oculto y fuego en motor. El fuego en vuelo es muy peligroso por dos razones principales, en primer lugar por la generación de humos que impide la visibilidad de los aparatos de control por parte de los pilotos, además de que la toxicidad de los humos puede irritar los ojos y el sistema respiratorio. Otro peligro intrínseco a un incendio es la posible pérdida de integridad estructural de los materiales expuestos. Esto podría llevar a una pérdida de las capacidades de la aeronave y una consecuente pérdida de control. Además del fuego en vuelo existe el denominado “fuego post-accidente”, en este caso el fuego sobreviene al accidente, y no es una causa del mismo sino una consecuencia.

#### 3.1. Fuego oculto.

El fuego oculto se define como aquel que tiene lugar en las áreas inaccesibles para la tripulación. Es decir, las áreas fuera de la cabina presurizada. Muchas veces se dice que el fuego en los baños del avión es un fuego oculto. A pesar de que los lavabos forman parte de la cabina presurizada, si un incendio se da en los sistemas eléctricos que forman parte del baño, cisterna, tras las paredes..., el lavabo en definitiva, entonces será un incendio oculto.

El fuego oculto es muy peligroso por su propia naturaleza. Tarda en localizarse y poder acceder a la fuente, si es posible, también requiere tiempo. Suele ser detectado por sensores, aparición de humo en cabina o aumento de temperatura en determinados lugares. Una vez se detecta, la tripulación ha de tratar de extinguirlo. Para ello puede ser necesario levantar paneles del techo, suelo, pared... Estas acciones ocupan tiempo y durante este tiempo el fuego puede haberse propagado a más lugares. Cuanto más tarde en ser detectado se dispone de menos tiempo para aterrizar y por tanto la posibilidad de sobrevivir también se ve mermada.

Las principales causas de un fuego oculto son las siguientes:

- *Cableado defectuoso.* Un cable con un defecto puede iniciar un incendio mediante el fenómeno denominado “arco eléctrico”. Este fenómeno es una descarga eléctrica que sucede entre dos electrodos situados en una atmósfera gaseosa. Esta descarga conlleva un aumento de temperatura. Por regla general el recubrimiento de los cables es capaz de soportar estas temperaturas. No obstante se puede generar una llama

debido a la acumulación de polvo, restos de lubricantes, etc. En definitiva, unos cables defectuosos pueden dar lugar a un arco eléctrico, hecho que deriva en un sobrecalentamiento de los cables que puede dar lugar a un incendio de los materiales contiguos. Además de por los sensores, otra manera de detectar este tipo de incendios es el sonido que causan pues los incendios eléctricos poseen un “chisporroteo” muy característico.

- *Fallo en los componentes eléctricos.* Dentro de las aeronaves hay motores eléctricos que han de cumplir diversas funciones, tales como ejercer de “starters”, es decir, proporcionar la energía necesaria para que la turbomaquinaria pueda arrancar, o mantener a la aeronave en vuelo en caso de pérdida de motor. Además las aeronaves tiene baterías que han de suplir todas las necesidades eléctricas de elementos tales como radio, instrumentos eléctricos de navegación, luces, sistema de flaps, tren de aterrizaje...

Los generadores (ya sean baterías o motores eléctricos) pueden recalentarse y dar lugar a un incendio debido a que están colocados en áreas contaminadas. Las baterías emanan gases ácidos y los motores eléctricos están colocados cerca de la turbomaquinaria. Es por eso que un buen sistema de ventilación también es necesario a la hora de prevenir incendios.

Este tipo de incendios puede ser detectado gracias a los sensores de la aeronave, puede encenderse la luz de “warning” de sobre voltaje, o leerse una carga eléctrica mayor de lo normal. Cabe mencionar que si un incendio por fallo de componente eléctrico es detectado en la fase inicial podría bastar con desconectar el equipo en cuestión. Sin embargo esto también puede suponer un riesgo puesto que en ocasiones supondría un aterrizaje sin flaps, o una pérdida de guía si el vuelo es instrumental (vuelos nocturnos o con poca visibilidad).

- *Impacto de rayo.* Las aeronaves están preparadas para volar a través de una tormenta eléctrica sin sufrir daños. Sin embargo ha habido ocasiones en que el impacto de un rayo en la aeronave ha iniciado un fuego. Esto solamente ha sucedido en aeronaves cuyo mantenimiento no era adecuado y el material aislante encargado de proteger frente a rayos eléctricos estaba contaminado o dañado.
- *Sangrado .Fugas de aire caliente.* Ciertos aerorreactores utilizan sistemas de sangrado de aire para evacuar un exceso de aire en el motor. El sangrado consiste en derivar aire del flujo principal. Se realiza en determinados puntos para mejorar la estabilidad de la aeronave, controlar la combustión o refrigerar el motor. El riesgo que supone en cuanto a los incendios es que al estar el aire sangrado caliente, si hay alguna fuga este aire puede recalentar sistemas o partes de la aeronave que no están preparados para soportar tan altas temperaturas. Este recalentamiento conllevaría una ignición y un posterior incendio.

Así pues, el fuego oculto supone un riesgo para la tripulación ya que a la dificultad de extinguirlo se añade la dificultad de encontrarlo y acceder a él.

### 3.2. Fuego en cabina

El fuego en cabina es aquel que tiene lugar dentro de la cabina, como su propio nombre indica. Este tipo de fuego es el menos peligroso en cuanto a que es fácilmente detectable y extinguido gracias a los sistemas de extinción que llevan los aviones. El principal problema que presenta es que es en la cabina donde más elementos que prenden con facilidad se encuentran. El equipaje de mano situado en los compartimentos de cabina, las revistas, papeles y libros de los pasajeros, la ropa de los propios pasajeros... todos estos elementos propagan el fuego rápidamente. Es por eso que la velocidad de reacción de la tripulación ante un fuego en cabina es un factor determinante a la hora de conseguir extinguir este tipo de incendio. Dos factores de riesgo que subyacen a la existencia de un fuego en cabina son la posible incapacidad de la tripulación y la entrada en pánico de los pasajeros. El hecho de que el fuego se encuentre en cabina implica que el humo que pueda surgir de la reacción, así como el calor generado, invadan rápidamente la cabina, pudiendo intoxicar y por tanto incapacitar a la tripulación. Además, los pasajeros pueden entrar en pánico y al querer alejarse instintivamente de la fuente de incendio, podrían crear una condición fuera de equilibrio que dificultara el control de la aeronave. Esto dos factores confirman la necesidad de una actuación rápida por parte de la tripulación.

Los lugares de la cabina donde más comúnmente tiene lugar un incendio son los siguientes:

- *Lavabo.* A pesar de la normativa, las campañas publicitarias y las advertencias de riesgo, todavía hay gente que utiliza los lavabos para fumar clandestinamente. Esto supone un riesgo enorme puesto que una colilla puede prender fácilmente cualquier elemento que se encuentre en el lugar de deshechos. Es por este motivo por el cual siguen existiendo ceniceros en los baños de los aviones. Porque si el fumador clandestino tira la colilla a la papelera el riesgo de incendio es mucho mayor que si la tira en un cenicero.
- *Elementos de cocina.* Para servir la comida del catering caliente las aeronaves disponen de elementos como hornos, hervidores de agua y calentadores de café. Si elementos tales como servilletas, envoltorios de comida... son olvidados dentro del horno o este es utilizado como lugar de almacenamiento, un incendio puede tener lugar. Los incendios del horno rara vez suponen un problema grave,



Ilustración 3.2-1: Lavabo de un avión. Cenicero abajo a la izquierda.

puesto que simplemente manteniendo su puerta cerrada el oxígeno se acabaría y el incendio se extinguiría. Otro riesgo lo suponen los calentadores de agua o café pues si se dejan encendidos pueden sobrecalentarse y derivar en un incendio.

- *Papelera*. En las papeleras puede tener lugar un incendio debido a cigarrillos, calor excesivo debido a platos o bebidas calientes o reacciones químicas. Estos incendios suelen ser de pequeña magnitud y por tanto fácilmente controlables.
- *Compartimento de equipaje de mano*. Baterías de litio de aparatos electrónicos, artículos peligrosos como quitaesmaltes... pueden iniciar un incendio en el compartimento.

### 3.3. Fuego en motor o en la APU (Auxiliar Power Unit)

Detectar un fuego en motor no es tan fácil como pueda parecer. Se puede detectar gracias a las lecturas del panel de control del capitán. Una bajada en la presión del combustible o medidas fluctuantes de la presión del combustible pueden ser indicativos de un conducto de combustible roto, circunstancia que suele desencadenar un incendio de motor. Sólo pueden hacerse dos cosas si el motor se incendia, en primer lugar cortar el flujo de combustible, en segundo lugar realizar un aterrizaje de emergencia. Si se corta el flujo de combustible puede llegar a extinguirse el incendio, pero si éste está muy avanzado lo único que puede hacerse es intentar aterrizar, con la esperanza de que la alta velocidad alcanzada pueda apagar el incendio. El fuego en motor es un problema grave, porque ya no sólo existe el riesgo de un incendio a bordo, sino que el motor en cuestión deja de funcionar como tal. Para evitar la propagación del fuego a la cabina hay en la sujeción de los motores a las alas una mampara cortafuegos de material resistente. Este tipo de mamparas también se utilizan para aislar los tanques de combustible del resto de la aeronave. No obstante, no son ignífugas y pasado un cierto tiempo el fuego se propaga igualmente.

El piloto ha de ser capaz de aterrizar la aeronave sin un motor e incluso sin pista de aterrizaje, puesto que la primera recomendación en cuanto se detecta un incendio en motor es aterrizar el aparato.

Otra de las causas que puede generar fuego en el motor es la intromisión de pájaros. Si las aves entran en el motor los álabes de la maquinaria pueden romperse y ser tragados por el motor, lo que probablemente implique una explosión y un incendio. Así sucedió en el caso de un Dassault Falcon 20<sup>2</sup> en 1995 París: la entrada de aves en el motor le llevó a fallo y a incendio del fuselaje.

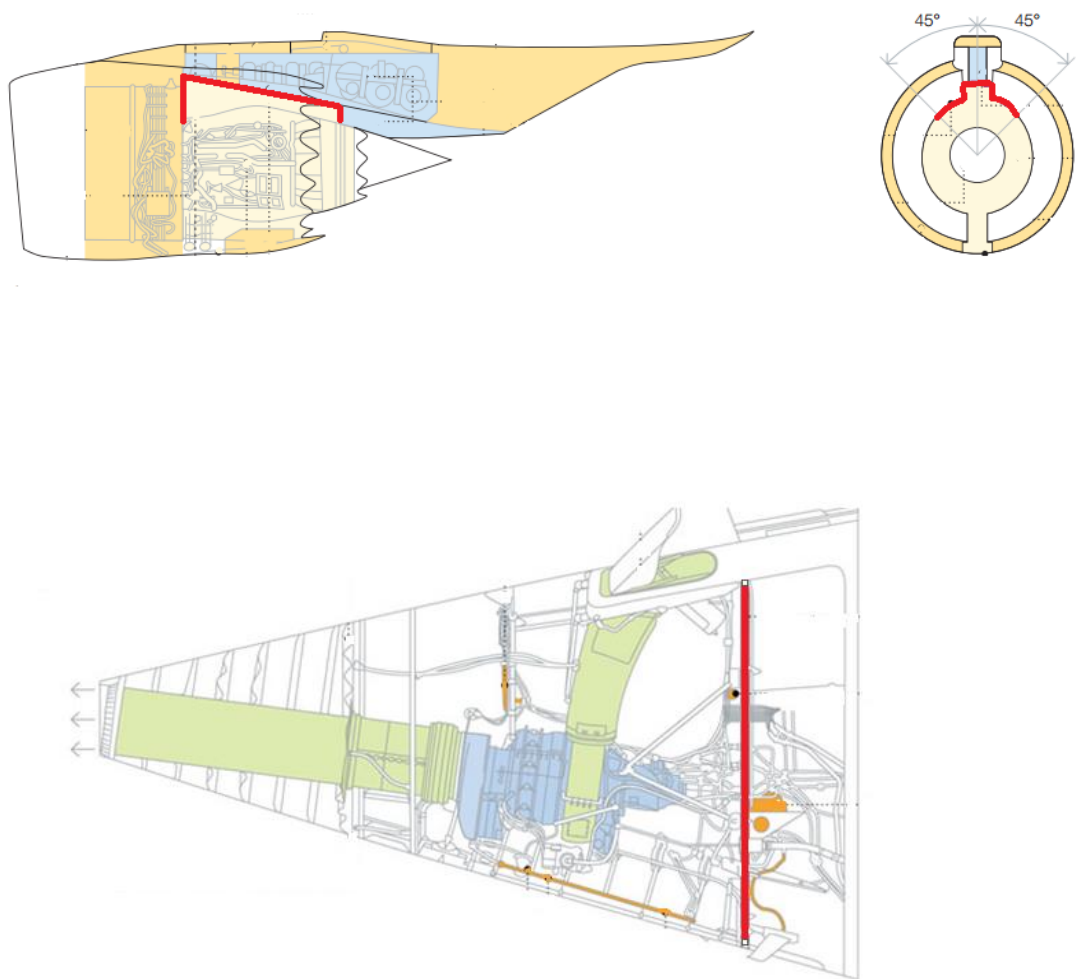
Otro de los elementos, fuera de la cabina presurizada, con un riesgo de incendio es la APU (Auxiliar Power Unit). Esta unidad tiene una estructura igual a la del motor, pero no

---

<sup>2</sup> Base de Datos de "Aviation Safety". Accidentes de ingesta de pájaros.

produce empuje. Su misión es actuar como fuente de energía para la aeronave. Ejerce como sistema de arranque de los motores y suministra la energía necesaria del avión cuando los motores están apagados. La APU se sitúa en la cola del avión y también es un elemento que alcanza elevadas temperaturas. Lo cual incide en el riesgo de fuego de la aeronave.

Para evitar incendios tanto de la APU como del motor, ambas estructuras están protegidas por un mamparo cortafuegos de fino espesor. Tal y como se muestra en las siguientes imágenes de la revista de Boeing sección: "Fire Protection:Engines and APU".



**Ilustración 3-2: Localización de los cortafuegos en Motor (arriba) y APU (abajo). Cortafuegos indicado en color rojo.**

Estos mamparos tienen un espesor característico y están manufacturados con materiales cuya resistencia a las altas temperaturas es elevada, como el titanio o el acero inoxidable. Otra propiedad importante es que han de ser resistentes a la corrosión, pues



de lo contrario podrían corroerse y perder cualidades mecánicas y térmicas, lo que daría lugar a una protección inadecuada de los motores y la APU.

### **3.4. Estudio estadístico del riesgo de los fuegos en vuelo.**

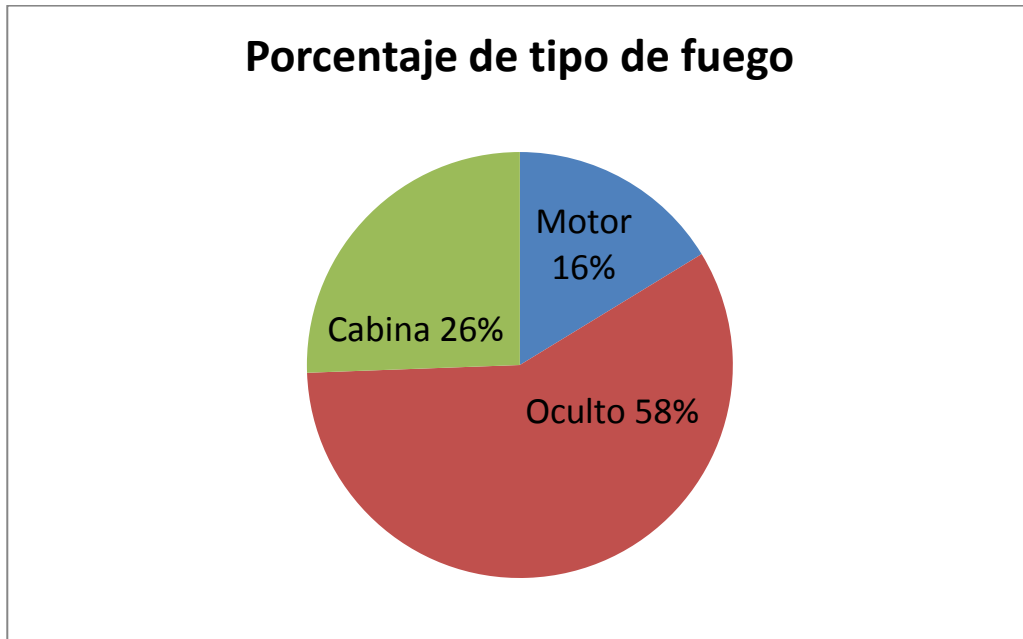
Con el objetivo de conocer los riesgos de cada tipo de incendio y la probabilidad de supervivencia, cabe realizar un pequeño estudio sobre todos los accidentes relevantes y de carácter catastrófico a lo largo de la historia de la aviación que han tenido como causa un incendio. Todos estos accidentes se encuentran en la base de datos de la fundación de seguridad de vuelos "Flight Safety Foundation"<sup>3</sup>. Una variable muy importante que se estudiará es el tiempo que transcurre hasta que el accidente sea una fatalidad sin supervivientes.

Cabe mencionar que los accidentes o incidentes objeto de estudio están clasificados de alta gravedad, o bien por el número elevado de muertes o por los destrozos generados en la aeronave. En el ANEXO 1 se muestran los datos analizados y el desarrollo llevado a cabo para la obtención de las estadísticas que se muestran a lo largo de este apartado.

Un dato muy interesante es saber qué tipo de fuego suele desembocar con más frecuencia en trágico accidente. En este gráfico de tarta se puede ver claramente como el fuego más peligroso es el fuego oculto. Esto tiene sentido puesto que en muchas ocasiones el foco del incendio se sitúa en lugares inaccesibles incluso para los operarios de mantenimiento. Es el caso del accidente del vuelo 111 de SwissAir, en que el incendio se desencadenó debido a un cable mal recubierto de una pantalla de reproducción de video de primera clase. Otro ejemplo de este tipo de situaciones sería el ocurrido en el año 2000 en un vuelo operado por AirTran Airways. Lo que sucedió en este caso es que una fuga en el lavabo del baño hizo que el sistema eléctrico cercano entrase en cortocircuito.

---

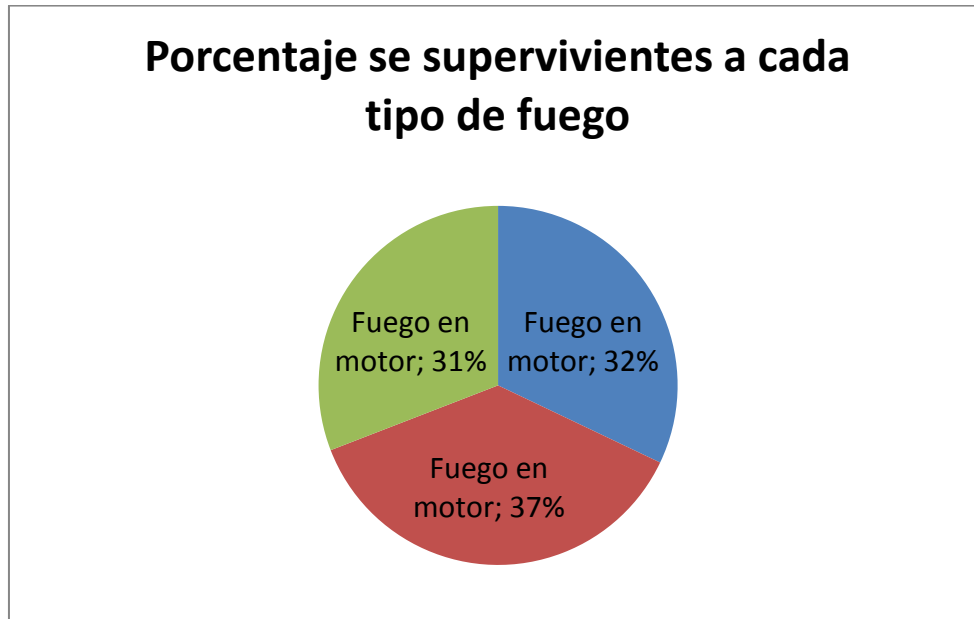
<sup>3</sup> "Flight Safety Foundation": La organización fundada en 1945 posee una amplia base de datos con un registro de todos los accidentes de la historia de la aviación.



**Ilustración 3-4.1. Porcentaje que tipo de fuego en una aeronave.**

Como ya se ha explicado previamente uno, uno de los principales peligros de este tipo de incendios es su rápida propagación hacia la cabina, lo que implica una gran cantidad de humo denso que impide la visibilidad de los tripulantes. Así pues, cuanto más se mejoren los materiales de una aeronave ante la posible propagación de un incendio mayor probabilidad de supervivencia existirá. Lo que lógicamente implica una mejor seguridad.

En cuanto a la peligrosidad de cada uno de los incendios se concluye que para el estudio realizado los tres tipos son igual de catastróficos. El fuego es un elemento mortal, ya sea por propagación en cabina, pérdida de integridad estructural, pérdida de estabilidad, etc. En este gráfico es muy importante tener en cuenta el tipo de accidentes objeto de estudio. El hecho de haber escogido accidentes e incidentes de alta gravedad es el motivo que hace que el porcentaje de supervivencia sea parecido. No obstante cabe mencionar que, en términos generales, los incendios en cabina suelen poder extinguirse antes de que el incidente sea catastrófico, tal y como se ha explicado previamente.



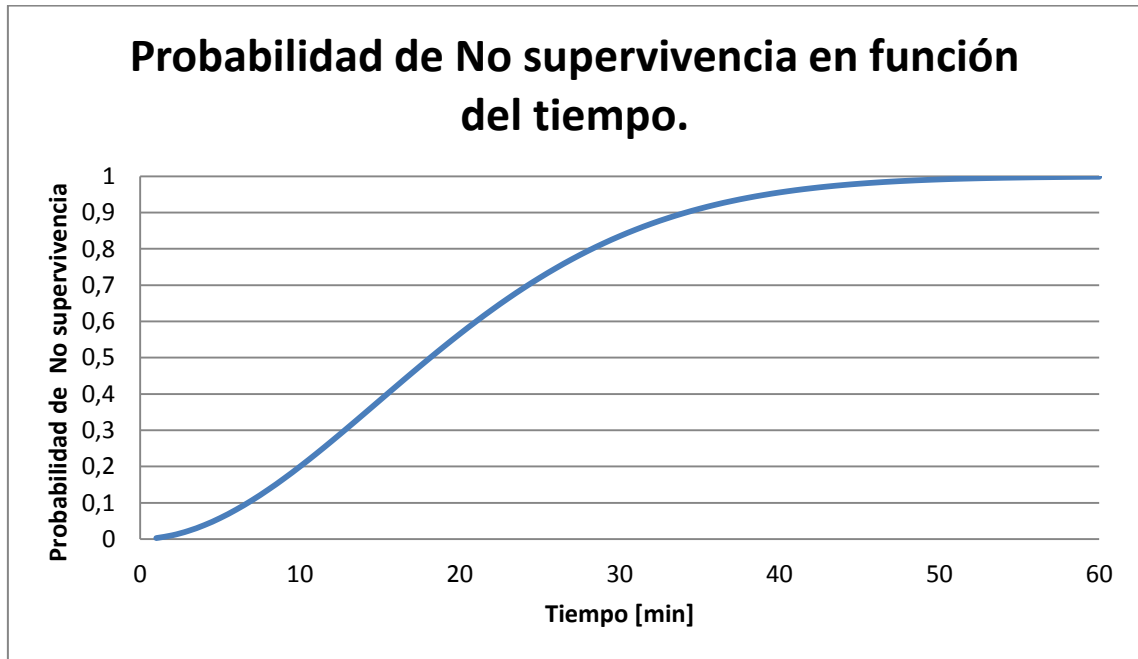
**Ilustración 3-4.2: Porcentaje de supervivencia por tipo de fuego.**

Con las lecturas de las cajas negras se pudo conocer el momento en que el capitán informaba de que se había detectado un fuego y el momento en que se pierde conexión con el aparato, lo que implica que la aeronave ha perdido el control definitivamente. El tiempo transcurrido entre estos dos instantes se denomina “tiempo transcurrido antes de que no haya posibilidad de supervivencia”. Este es un dato que no se tiene de todos los accidentes registrados, puesto que en muchas ocasiones o bien la caja negra no se encuentra, o las transcripciones no son precisas, o los eventos no se comunicaron explícitamente por el capitán. No obstante los datos existentes son más que suficientes para poder realizar un estudio estadístico que relacione el tiempo con la posibilidad de sobrevivir.

Mediante la ley de Weibull se puede ajustar cualquier probabilidad de fallo gracias a sus tres parámetros, el de forma, el de escala y el de tiempo. Utilizando esta ley se obtiene la siguiente fórmula:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{22}\right)^{1.9}}$$

Representando la ley se obtiene la siguiente curva:

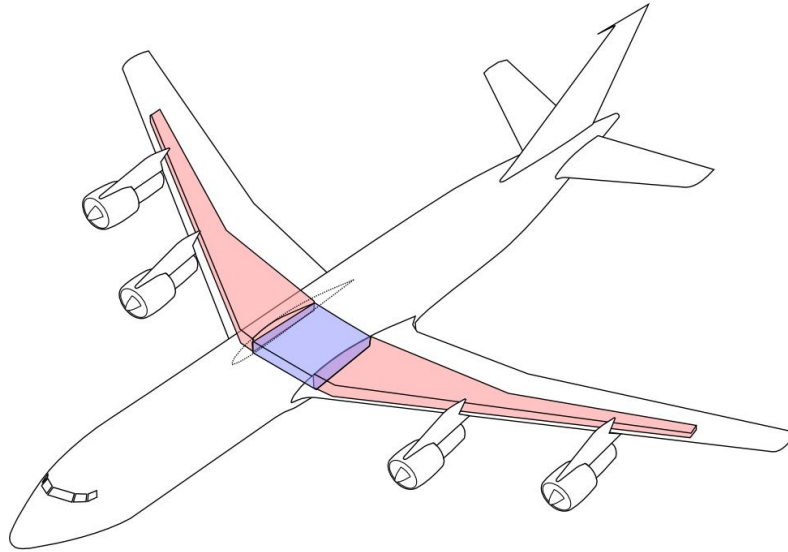


Donde se puede observar que prácticamente a partir de 40 minutos desde que se percibe un incendio es imposible sobrevivir al accidente.

El objetivo de cualquier empresa es desplazar esa curva a la derecha, es decir, aumentar las posibilidades de sobrevivir para el máximo tiempo posible. Esto se consigue mejorando la seguridad de las aeronaves frente a un incendio. Para ello se pueden tomar medidas tales como mejorar la resistencia al fuego de los materiales que conforman la aeronave, construir una cabina totalmente ignífuga, mejorar los sensores y sistemas de extinción de incendios de a bordo...

### 3.5. Fuego post-accidente

El fuego post-accidente es una de las consecuencias más graves y que más eleva el número de muertes tras un accidente. Este tipo de fuego suele tener lugar debido al combustible que queda en el avión tras aterrizar. Cuando un avión tiene una emergencia y ha de aterrizar antes de lo previsto bajo unas condiciones de aterrizaje no favorables (pérdida de tren de aterrizaje, viento cruzado fuerte, fuego en motor...) lo primero que ha de realizar es deshacerse del fuel cargado. Esto es necesario puesto que parte del fuel se alberga en la parte baja del avión, tal y como se muestra en la figura 3.5-1. Un aterrizaje peligroso puede significar un aterrizaje con la parte baja del avión (consecuencia de una rotura del tren de aterrizaje), la fricción contra el suelo aumenta la temperatura e incluso rompe el material. La exposición a altas temperaturas hace que el combustible se inflame y provoque un incendio.



**Ilustración 3-5.1: Localización de los principales tanques de combustible en un avión tipo comercial.**

El riesgo de muerte inherente a este tipo de fuegos está en relación directa con la velocidad de evacuación de los pasajeros. Estos han de ser evacuados lo más rápido posible antes de que se intoxiquen por los gases del incendio o antes de ser alcanzados por las llamas. Asimismo un buen equipo contraincendios en tierra con un buen tiempo de reacción también podría salvar vidas.

El problema principal de este tipo de incendios es que fácilmente pueden alcanzar la condición de “flashover”. Esta condición se da en un ambiente lleno de gases inflamables cuando todos los elementos del ambiente alcanzan la temperatura de ignición de los gases. Una vez alcanzada dicha temperatura el fuego se propaga por toda la atmósfera y la aeronave entera se encuentra en llamas. Con la utilización de materiales aislantes o capaces de disipar rápidamente el calor acumulado, así como materiales que eviten la propagación de llama, la condición de flashover es más difícilmente alcanzable.

Según la FAA<sup>4</sup> el 40% de las fatalidades que ocurren en un incendio post-accidente se deben a la inhalación de gases tóxicos producto de la quema de materiales en cabina. La pretensión de futuro es utilizar materiales ignífugos en toda la cabina para así reducir el número de muertes.

En las aeronaves construidas con un recubrimiento de aluminio (que son prácticamente todas las aeronaves comerciales existentes actualmente), la integridad estructural del aluminio juega un papel importante. Si el fuselaje no se ha dañado en el golpe del accidente y ,según la NFPA 402<sup>5</sup>, el tiempo escape para los humanos de una aeronave incendiada es de 3 minutos. Además si el aluminio está directamente expuesto a las llamas

<sup>4</sup> FAA “*Federal Aviation Administration*”. Fundada en 1926 en los Estados Unidos de América para organizar el tráfico aéreo.

<sup>5</sup> NFPA “*National Fire Protection Association*”. Fundada en 1896 en los Estados Unidos de América. La norma 402 hace referencia es una guía para las operaciones de rescate y combate de incendios en aeronaves.

Julio 2014

será atravesado en aproximadamente 60 segundos. Una vez más estos problemas justifican la necesidad de una rápida actuación y una mejora de los materiales aeroespaciales.

## 4. Materiales aeronáuticos.

En este apartado se hará un repaso de los materiales aeronáuticos más empleados en la actualidad, sus características principales y su comportamiento ante condiciones de altas temperaturas o ante una exposición al fuego. Es por ese motivo que los materiales objeto de estudio son metales. Los metales no son inflamables y presentan mejores propiedades ante elevadas temperaturas que los materiales compuestos.

Las cualidades principales que un material aeronáutico ha de reunir son las siguientes:

- Baja densidad: de este modo se asegura un peso más bajo.
- Propiedades estructurales adecuadas: los aviones están sometidos a numerosas cargas y ciclos de trabajo. Los materiales que los constituyen han de ser capaces de soportar dichos esfuerzos durante un tiempo de vida estipulado.
- Resistencia a la corrosión: La presencia de agentes químicos en una aeronave la hace susceptible de ser corroída, los materiales han de ser capaces de resistir la corrosión para evitar roturas por la misma.
- Buen comportamiento a elevadas temperaturas: la fricción el medio, las temperaturas de combustión... hacen que determinadas partes de la aeronave se expongan a elevadas temperaturas; por ello los materiales escogidos han de ser capaz de conservar una integridad estructural a altas temperaturas. Además, en caso de un incendio en una aeronave se dispondrá de un mayor tiempo de supervivencia si los materiales de la misma resisten las altas temperaturas.

A lo largo de la historia los materiales empleados en la ingeniería aeronáutica han variado ampliamente. Las primeras aeronaves se construían con madera y tela. Con la llegada de las guerras mundiales la investigación aeronáutica entró en auge y esto dio lugar a la introducción de nuevos materiales en el campo. Comenzaron a emplearse metales en las aeronaves, tales como acero, aluminio...El acero ha ido cayendo en desuso por su elevada densidad, lo que implica un aumento de peso en la aeronave. Sin embargo, el uso de aluminio fue aumentando hasta ser en la actualidad el material más utilizado en las aeronaves. Esto se debe a los avances en investigación, que han propiciado nuevas aleaciones de aluminio con propiedades mejoradas. Cabe mencionar la importancia del titanio en la construcción de aeronaves. Este es un material de baja densidad en comparación con el acero, si bien prácticamente el doble que la del aluminio. Lo que otorga al titanio la capacidad de ser un buen material aeronáutico es su elevada resistencia estructural, así como su comportamiento adecuado a elevadas temperatura, lo cual lo hace un material idóneo para partes como la turbomaquinaria. El problema principal del titanio es su elevado coste.

### 4.2. Acero.

El acero es una aleación de hierro que contiene carbón y alguno o más aleantes. En general es el material más utilizado en ingeniería estructural, pues sus propiedades estructurales son muy buenas, sin embargo su elevada densidad es un factor limitante en

Julio 2014

ingeniería aeronáutica. Por ese motivo su uso en aeronaves se limita a componentes que están sometidos a elevadas cargas estructurales y necesitan resistirlas; además estos componentes requieren una buena relación resistencia volumen, es decir, han de ocupar poco así como poder resistir grandes cargas. El tren de aterrizaje, las juntas de ala a fuselaje, el pílón, son ejemplos de aplicaciones aeronáuticas del acero.

Los aceros más utilizados en la industria aeronáutica son los siguientes:

- Acero con contenido medio en carbono de baja aleación. El contenido en carbono está entre el 0.25 y 0.5%. y contiene una concentración elevada de aleantes cuyo objetivo es aumentar la dureza y la resistencia a altas temperaturas. Estos aleantes pueden ser níquel, cromo, molibdeno, vanadio y cobalto. Se pueden conseguir niveles de tensión de fluencia entre 1500 y 2000MPa. Este tipo de acero es normalmente usado para el tren de aterrizaje.
  - Aleación 4340, sus principales aleantes son el cromo el níquel y el molibdeno. Como estas combinaciones se consigue mejorar la resistencia a impacto y fatiga, así como una mejorada resistencia a tenacidad con la temperatura
  - Acero Aermet 100, esta aleación es un tipo martensítico de acero con propiedades muy elevadas de resistencia estructural. Además posee una muy buena ductilidad y dureza. Se podría utilizar en tren de aterrizaje, sujeción del motor...
  - H11, este tipo de acero se caracteriza por poder trabajar bien a altas temperaturas, ya que su punto de fusión es de 1427°C
- Aceros Maraging. Este tipo de acero también posee un alto contenido en aleantes, sin embargo la fracción de carbono que presenta es muy reducida, del orden de, 0.03%. El término “maraging” proviene de martensita y *age hardening*. La martensita es un estado del acero caracterizado por una transformación de la austenita rápida y sin difusión. Esto da lugar a una microestructura fina en agujas con unas propiedades mecánicas muy elevadas, pero frágiles y poco dúctiles. Tras realizar un proceso de age-hardening (endurecimiento por precipitación) se obtiene un acero con elevadas propiedades estructurales, ductilidad y resistencia a fractura. La inusual dureza conferida al acero por medio de este tratamiento lo hace un muy buen material para condiciones críticas en estructuras de las aeronaves
- Acero inoxidable. Su principal característica es su elevada resistencia a corrosión, contiene una pequeña fracción de carbono (0,08 – 0,25%) y una elevada concentración de cromo (12-26%), este es el elemento que confiere las propiedades anticorrosivas, el cromo reacciona con el oxígeno atmosférico creando una capa de óxido de cromo que protege la capa inferior de material. Es utilizado en aquellos lugares en que tanto resistencia a corrosión como elevada fuerza son requeridos.
  - 15-5 PH. Los aceros inoxidables PH son los más utilizados en aeronáutica. El término PH indica que el acero ha sido endurecido por precipitación. El primero término indica el contenido en cromo y el segundo en níquel. Este acero concreto es martensítico, tras el procesado se mejora el procesado en caliente.



Julio 2014

- 17-4 PH. Este acero es de tipo semiasuténítico, tras el procesado se transforma en martensita seguida de precipitación. El tratamiento térmico de estos aceros es más complejo que el de los martensíticos.

Cabe mencionar que una de las primeras aplicaciones del acero inoxidable fue en el fuselaje externo de aeronaves súper o hipersónicas. La “piel” de la aeronave alcanza elevadas temperaturas debido a la fricción con el medio, lo que podría causar un reblandecimiento del aluminio; sin embargo el acero puede resistir hasta 400°C sin modificar propiedades mecánicas. No obstante; con la introducción de nuevos materiales más ligeros, como el titanio, dejó de dársele este uso al acero inoxidable.



Ilustración 4-1: Bristol 188, aeronave supersónica de 1950, con recubrimiento de acero inoxidable.

A continuación se resumen en una tabla las propiedades más relevantes de los tipos de acero más utilizados en ingeniería aeronáutica.

Tipos de Acero	Aleación	Composición	Densidad (g/ cm <sup>3</sup> )	Límite elástico (MPa)	UTS <sup>6</sup> (MPa)	Resistencia a corrosión
Contenido medio C, aleantes	4340	0.4C, 1.8Ni,0.8 Cr, 0.7 Mn, 0.25 Si, 0.25 Mo	7.85	410	750	Baja
	Aermet <sup>®</sup> 100	0.25 C,13.5 Co,11 Ni,3 Cr,1.2 Mo	7.8	1720	1960	Baja
	H11	0.35 C,5 Cr,1.5 Mo, 1 Si, 0.45 V, 0.4 Mn, 0.03 Ni	7.8	1650	2000	Baja
Aceros Maraging	18Ni (200)	0.3 C,18 Ni, 8.5 Co, 3.3 Mo,0.2 Ti, 0.1 Al	8.1	660	970	Baja
	18Ni (300)	0.3 C, 18 Ni, 9 Co,5 Mo, 0.7 Ti, 0.1 Al	8.1	1950	2000	Baja
	18Ni (350)	0.3 C, 18 Ni, 8.5 Co, 3.3 Mo, 0.2 Ti, 0.1 Al	8.1	2300	2370	Baja

<sup>6</sup> UTS, del inglés “Ultimate Tensile Strength”

Aceros inoxidables	15-5 PH	0.07 C, 15 Cr, 4.5 Ni, 3.5 Cu, 1 Mn, 1 Si, 0.3 Nb	7.78	1400	1470	Elevada
	17-4 PH	0.07 C, 16 Cr, 4 Ni, 4 Cu, 1 Mn, 1 Si, 0.3 Nb	7.78	1150	1330	Elevada

Ilustración 4-2. Propiedades de los aceros más empleados en ingeniería aeronáutica.

### 4.3. Titanio.

El titanio es un metal muy apreciado en el campo debido a sus cualidades principales: densidad moderada, elevada resistencia, larga vida a fatiga, excelente resistencia a oxidación... Su uso está muy extendido en elementos del motor ya que sus buenas propiedades mecánicas se mantienen en elevadas temperaturas (500-600°C). La gran resistencia del titanio permite en ocasiones que un elemento soporte la misma carga que uno de aluminio pero ocupando menos espacio, lo cual resulta beneficioso en numerosas aplicaciones, tales como tubos conductos, tren de aterrizaje...

El titanio se utiliza cuando su elevada resistencia permite que un elemento de la aeronave soporte la misma o más carga que el mismo elemento de aluminio pero ocupando menos.

Sin embargo, a pesar de reunir todas estas propiedades no es el material más utilizado en aeronáutica debido a su elevado coste. Es por eso que actualmente presente aproximadamente el 10% del peso de una aeronave, siendo en un motor el 25-30% del peso.



Ilustración 4.3.-1: SR-71, Blackbird

El titanio también se ha utilizado como recubrimiento de aeronaves supersónicas, ya que puede aguantar número de mach de hasta 4-5 sin perder propiedades mecánicas (el aluminio no puede aguantar machs superiores a 1,5). Un caso curioso es la aeronave de reconocimiento desarrollada por la NASA en 1964, el SR-71 Blackbird, una aeronave antirradar en que el 85% de la estructura estaba hecha de titanio, y superaba el Mach de vuelo 3.

Las aleaciones de titanio más empleadas en aeronáutica son las  $\alpha+\beta$ -Ti. Se fabrican con la adición de estabilizadores tanto  $\alpha$  como  $\beta$  para conseguir formar granos de  $\beta$  y  $\alpha$ . Gracias a esto se consigue una resistencia a deformación por fluencia elevada para altas temperaturas, dureza y ductilidad (debido a la fase  $\alpha$ ) y a causa de la fase  $\beta$  se consiguen elevadas fuerza elástica y resistencia a fatiga. La aleación más utilizada es  $\alpha+\beta$ -Ti-6Al-4V.: de todas las aleaciones de

titanio utilizadas en motor es el 60%, y de las utilizadas en el armazón es el 80-90%<sup>7</sup>. Las propiedades de dicha aleación se resumen en la siguiente tabla:

$\alpha+\beta$ -Ti-6Al-4V	
Densidad (g/ cm <sup>3</sup> )	4.42
Fuerza elástica MPa	1000
Módulo de Young (Gpa)	115
Resistencia a corrosión	Elevada

Ilustración 4.3-2. Propiedades de  $\alpha+\beta$ -Ti-6Al-4V

#### 4.4. Aluminio.

El aluminio es el material más utilizado en ingeniería aeronáutica puesto que es un metal ligero. Cerca de 400.000<sup>8</sup> toneladas de aluminio son utilizadas al año en construcción de aeronaves civiles y militares. Un material bueno para la aeronáutica ha de ser ligero, duro y resistente, el aluminio es un material blando. Por ello es necesario endurecerlo para aumentar su resistencia. La ventaja que presenta este metal es que es fácilmente endurecible por acritud y tratamiento térmico.

Las principales ventajas que presenta son as siguientes:

- Coste moderado.
- Fabricación fácil, incluyendo los procesos de forja, tratamientos térmicos, etc.
- Es un metal ligero, de muy baja densidad.
- Elevadas fuerza específica y módulo elástico específico
- Presenta una Buena ductilidad y buena resistencia a fatiga.

Sin embargo, el aluminio también presenta algunas desventajas

- A elevadas temperaturas las propiedades mecánicas se ven empeoradas (reblandecimiento ocurre a partir de 150°C). Este es un dato muy relevante en este trabajo, puesto que se trata de comportamientos a elevadas temperaturas.
- Al no ser resistente a corrosión es susceptible a quebrar debido a la propagación de una grieta de corrosión
- Si entra en contacto con fibras de carbono se corroe

Las dos familias de aluminio que se utilizan principalmente en aeronáutica son las 2xxx (Aluminio-Cobre de forja) y la 7xxx(Aluminio-zinc de forja), concretamente las 2024-Tx<sup>9</sup> y 7075-

<sup>7</sup> Datos extraídos de "Introduction to Aerospace Materials". P.Mouritz, Woodhead Publishing Limited 2012. P-215.

<sup>8</sup> .Dato de Datos extraídos de "Introduction to Aerospace Materials". P.Mouritz, Woodhead Publishing Limited. P-173.

<sup>9</sup> Tx, Puede ser tratado térmicamente por solución y envejecido natural o artificialmente. Tratado por solución y envejecido natral o artificialmente o enfriado desde fabricación y envejecido artificialmente.

Julio 2014

T6<sup>10</sup>. Ambas familias son endurecidas por precipitación, lo cual es muy relevante en el campo ya que de este modo se mejora la resistencia de los materiales.

La familia 2xxx se caracteriza por tener una mayor tolerancia al daño y resistencia al crecimiento de grietas de fatiga. Las aleaciones de la familia 7xxx presentan mayor resistencia en general, la principal desventaja que presentan es que no son soldables.

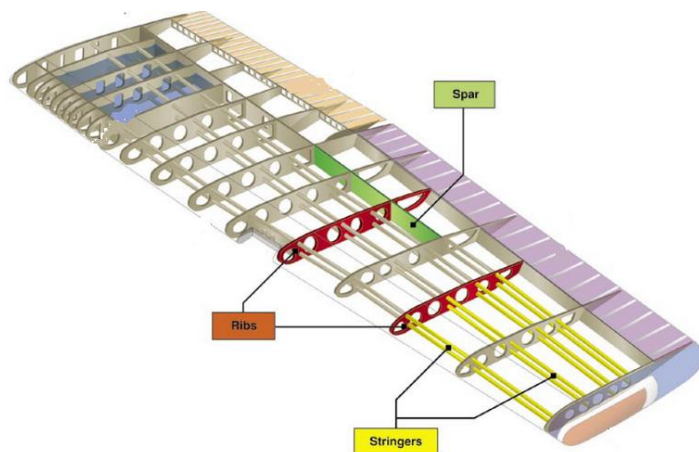
En la siguiente tabla se reúnen las principales características de los dos aluminios más utilizados en aeronáutica, 2024 y 7075.

Tabla 1 Propiedades del aluminio

	Al-Cu 2024-T3	Al-Zn 7075
Composición	Cu 4.4, Mn 0.6, Mg 1,3	Cu 1.6, Mg 2.5, Cr 0.23, Zn 5.6
Densidad [g/ cm <sup>3</sup> ]	2.7	2.7
UTS [MPa]	448	572
Límite elástico [MPa]	310	503
k [W/Km]	120	130
T_max	150	150

Para ahondar en las aleaciones de aluminio empleadas en aeronáutica se explican a continuación las aleaciones empleadas en la construcción del Airbus 380, la aeronave comercial más grande hasta el momento:

- Los “spar” o travesaños del ala han de soportar elevadas tensiones dado que, además, son los travesaños más grandes del mundo, para ello se seleccionó un aluminio 7040-T7651, caracterizado por su elevada dureza.
- Las “ribs” o costillas del ala están realizadas con la aleación 7449-T7651,
- Para los “stringers” se necesita más resistencia se utiliza la aleación 2027-T3511, con un contenido porcentual en zirconio, lo que aumenta la dureza a fractura y el límite de fatiga.
- Para la cobertura superior de las alas se desarrolló una aleación 7056-T7951, que mejoraba en un 40% la dureza a fractura de la aleación 7449
- Para la cobertura inferior de las alas se empleó 2027-T3511



4-3. Partes del ala de una aeronave

<sup>10</sup> T6, Tratado por solución y envejecido artificialmente.

Julio 2014

- La aleación 7040-T7451 se utiliza para numerosas aplicaciones tales como marcos de la cabina de mandos, vigas... Ofrece una resistencia estática y tenacidad muy buenas.
- En muchas juntas del fuselaje se emplea 2024-T432.

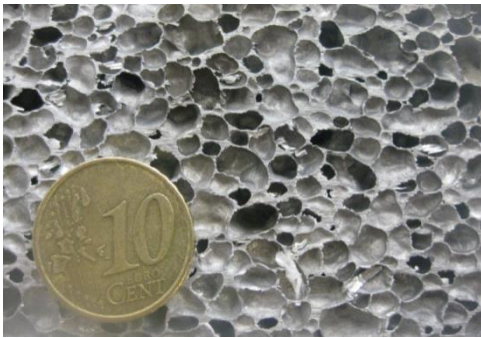
Con el ejemplo del Airbus 380, que utiliza un 66% de aleaciones de aluminio, se concluye que este metal es el más utilizado, y que además las aleaciones pueden modificarse con diferentes tratamientos térmicos y modificando la composición porcentual de las mismas con el fin de conseguir propiedades concretas y específicas.



4-4. A380, 66% Aluminio, capacidad máxima 853 pasajeros.

## 4.5. Espuma de Aluminio.

La evolución del mercado y la necesidad de mejorar los servicios prestados hacen que sea realmente importante la mejora o la inserción en el mercado de nuevos materiales con un conjunto de propiedades idóneo para ciertas aplicaciones. Por ello, en 1958<sup>11</sup> se crearon las primeras espumas de metales; en un principio no fueron muy utilizadas por su elevado coste de fabricación, pero gracias a la evolución de las tecnologías actualmente la creación de espumas de metales se está extendiendo y su un coste no muy elevado. Es el caso de la espuma de aluminio, un nuevo material que está empezando a emplearse en diferentes campos de la ingeniería debido a las propiedades que aúna.

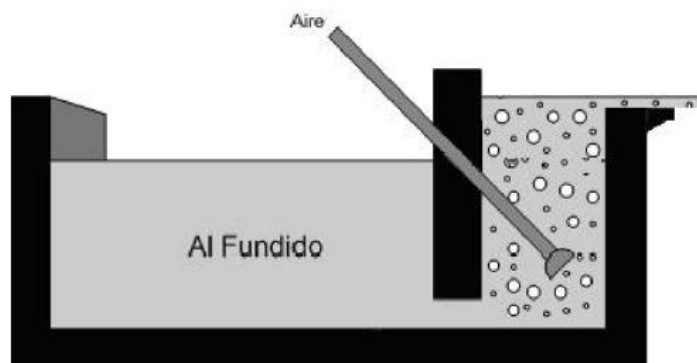


4.5-1. Espuma de aluminio. Detalle del poro.

La espuma de aluminio es un material poroso con una relevante combinación de propiedades físicas y mecánicas, como alta rigidez y bajo peso específico. Es muy buena absorbente de energía (de impacto, acústica, térmica...). No es inflamable, permanece estable a altas temperaturas hasta el punto de fusión y no modifica su forma a altas temperaturas, es no corrosible y reciclable. Es un material isotrópico con una distribución aleatoria de los poros dentro de la estructura.

El proceso de obtención de la espuma de aluminio puede ser muy diverso pues dependiendo del método utilizado se pueden obtener metales porosos, esponjas de metal, metales celulares o espumas de metal. En el caso de la última, que es el objeto de estudio, la fabricación se realiza mediante la inserción de gas al metal en fase líquida. También se puede realizar mediante el uso de un agente espumante.

Para poder inyectar el gas de forma eficiente es necesario aumentar la viscosidad del metal, de este modo se consigue que las burbujas no emerjan y se vayan formando en todo el espesor del líquido. La viscosidad se puede incrementar por la adición de partículas cerámicas (carburo de silicio, alúmina o magnesia). Es el caso de la espuma de aluminio objeto de estudio.



4.5-2 Fabricación de espuma de aluminio. Inserción de gas en fundición de elevada viscosidad.

<sup>11</sup> "Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones". J.A. Gutiérrez-Vázquez y J. Oñoro.

La conductividad térmica de las espumas de aluminio se estima en un  $1/10^{12}$  inferior a las de un metal denso de la misma aleación. Esto se debe a que el mayor volumen de la espuma es el relativo a los poros de aire, cuya conductividad térmica es muy baja,  $0.024$  [W/mk].

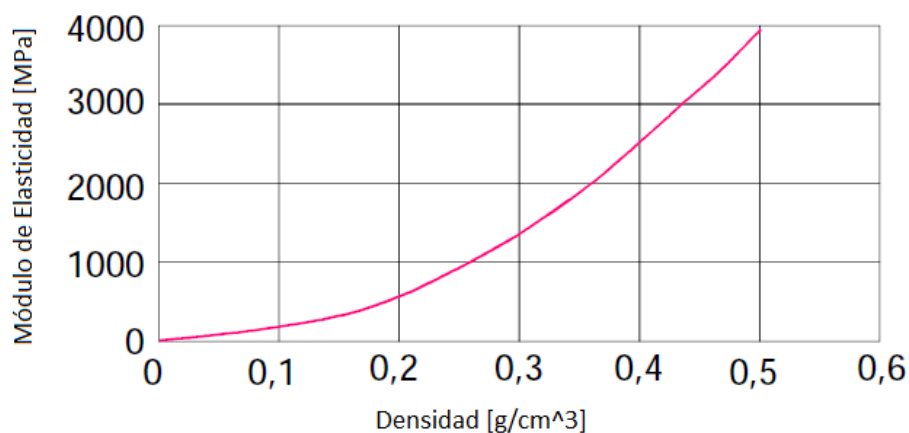
En la siguiente tabla se resumen algunas de las propiedades más relevantes de las espumas de aluminio

Tabla 4.5.-1. Propiedades de la espuma de Aluminio.

	Espuma de Aluminio
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0.2-0.3
k [W/mK]	16.9
Volumen de poros [%]	65-85
Resistencia a Compresión [MPa]	40

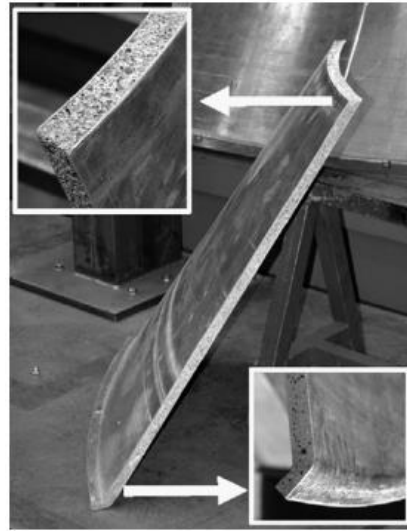
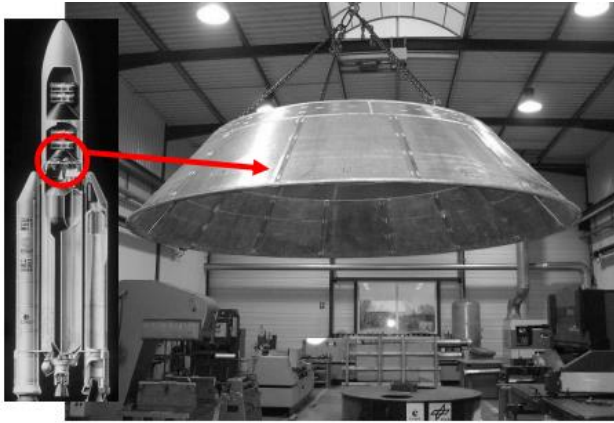
Así pues, la combinación de propiedades tales como buena resistencia al calor, elevada resistencia, incombustibilidad y la posibilidad de un fácil reciclaje hacen de la espuma de aluminio un material bastante versátil. En aplicaciones ingenieriles la espuma de aluminio se recubre con una lámina de algún metal, por ejemplo aluminio. De este modo se consiguen mejorar las propiedades mecánicas del material conservando las propiedades aislantes, tanto térmica como acústica. Además es anticorrosiva, propiedad muy relevante en la industria aeronáutica. Una desventaja de las espumas es su menor resistencia, por ejemplo, su módulo de elasticidad es mucho más bajo que en los aluminios y decrece con la densidad, tal y como se muestra en la siguiente imagen<sup>12</sup>. La espuma de aluminio disponible en el laboratorio y objeto del posterior estudio en laboratorio tiene una densidad de aproximadamente  $0.3$  g/cm<sup>3</sup>. Por tanto su módulo de elasticidad será de aproximadamente  $1300$  MPa, lo que son  $1.3$  GPa.

Tabla 4.5-3. Módulo de elasticidad en función de la densidad de la espuma de aluminio.



<sup>12</sup> Aluminium foam. TALAT Lecture 1410 Dr.Ing. Catrin Kammer, Goslar, Germany.

En el sector aeroespacial la espuma de aluminio ya se ha utilizado para algunas aplicaciones, por ejemplo, el cohete Ariane 5. En un principio se diseñó con panel de abeja pero se han probado prototipos de espuma de aluminio en sándwich. Esto reduciría notablemente el coste.



4.5-4. Cono espacial del Ariane 5. Prototipo de espuma de aluminio.

Otra ventaja que presentan los sándwiches es la isotropía de las propiedades y la ausencia de uniones o juntas, puesto que se puede moldear sin dificultad. Además la integridad estructural se conserva en caso de un fuego, aspecto muy importante como se ha visto en apartados anteriores. Además las espumas tienen alta capacidad de absorción de energía de impacto, propiedad que también aumentaría la seguridad de las aeronaves. Utilizada en paneles de techo o paredes también supondría un beneficio para el confort de los pasajeros, debido a sus buenas propiedades como aislante acústico.

#### 4.5. Materiales compuestos y otros materiales de uso en cabina.

A pesar de no ser objeto del estudio experimental posterior no deja de ser interesante mencionar los materiales que se utilizan en cabina. Estos materiales han de cumplir unos requerimientos anti-incendio. El objetivo puesto por la FAA <sup>13</sup> es obtener una cabina 100% ignífuga para reducir al máximo el número de muertes tras un accidente aéreo. Al año aumenta en un 1% <sup>14</sup> el uso de composites y polímeros ligeros y combustibles en componentes interiores de cabina, tales como suelos, paredes, techo, compartimentos para equipaje de mano... Este pequeño porcentaje implica un aumento en la carga de fuego (carga no resistente a un incendio), haciendo que las fatalidades puedan aumentar. El uso de materiales ultra-resistentes al fuego eliminaría la posibilidad de fuegos catastróficos en el

<sup>13</sup> Federal Aviation Administration.

<sup>14</sup> *Fire-Resistant Materials: Research Overview*. DOT/FAA/AR-97/99



Julio 2014

fuselaje y proporcionaría un mínimo de diez minutos de escape para los pasajeros en un incendio post-accidente.

En un avión comercial típico hay aproximadamente 7000kg de materiales combustibles en cabina, como por ejemplo persianas, cortinas, pintura, almohadas, mantas, alfombras...

Un ejemplo de prevención de incendios por bloqueo se encuentra en los asientos. Incluyen una capa de material bloqueador de fuego entre el cojín y la tapicería, normalmente espuma de poliuretano o aramida. Estos materiales ralentizan el crecimiento del fuego y pueden proporcionar 40-60 segundos de tiempo de escape adicional

#### 4.6. Comparación de los materiales.

En este apartado se recogen los materiales citados para poder compararlos con mayor facilidad. Se tomará el material más utilizado de cada familia.

Tabla 4.6-1. Comparación de propiedades de materiales aeronáuticos.

Material	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Max Temp [K]	k [W/mK]	Módulo de Young [GPa]	Resistencia a corrosión
Acero Inoxidable	7.78	673	14-16	180	Elevada
Ti-Al5-V4	4.42	773-873	6,7	110	Elevada
Al 2024	2,7	423	121	73	Baja
Espuma de aluminio	0,1 – 0,8	930	16.8	1.3	Elevada

Como se aprecia, cada tipo de materiales es adecuado para una determinada aplicación. En caso de resistencia a altas temperaturas los mejores son el titanio y la espuma de aluminio; sin embargo ésta última es peor como elemento estructural, pero ofrece un precio mucho más bajo. En cuanto a peso añadido, la más ligera es la espuma de aluminio.

A continuación se analizan una serie de experimentos para observar las cualidades de la espuma de aluminio, así como su comparación con el aluminio aleado.



## **5. Propiedades térmicas y caracterización en laboratorio.**

En esta parte del trabajo se pretende realizar una comparación del aluminio y la espuma de aluminio en relación a su comportamiento a elevadas temperaturas. Se ha escogido el aluminio porque es el material más extendido en el sector, y se compara con la espuma de aluminio puesto que ésta teóricamente se comporta mejor a elevadas temperaturas. De este modo se realiza un estudio comparativo en que se podrán obtener conclusiones sobre el uso de estos materiales en el sector aeronáutico. Por otro lado resulta muy interesante el estudio de la espuma de aluminio como material emergente, puesto que aún muchas propiedades interesantes en el uso de determinadas aplicaciones, no sólo en el sector de la ingeniería aeroespacial.

Los experimentos llevados a cabo son tres; en primer lugar los materiales se someterán a elevadas temperaturas en un horno para comprobar su capacidad aislante en canto a transmisión de calor. En segundo lugar los materiales se someterán a una exposición directa de llama simulando las condiciones en un incendio, de este experimento se obtendrán temperaturas, y finalmente los materiales serán sometidos a un ensayo de flexión con el fin de ver cómo se pueden ver minadas sus propiedades mecánicas, en este caso, resistencia a flexión, tras la exposición frente a una llama.

### **5.1. Flujo de calor a través de un mamparo.**

Una de las propuesta más extendidas en el campo de la prevención y tratamiento de incendios en aeronaves es la utilización de un mamparo cortafuegos en los pasillos de la cabina. De este modo podría evitarse la propagación de un incendio a lo largo de la aeronave. Asimismo un material que sea un buen aislante puede colocarse en determinadas partes de la aeronave para minimizar el flujo de calor de un foco de fuego a la otra parte del mamparo. El objetivo del siguiente experimento es caracterizar el flujo de calor a través de una serie de materiales.

#### **5.1.1. Introducción al experimento y montaje.**

El experimento consiste en un horno con una puerta agujereada, de tal forma que la muestra de material a testear se coloca en el agujero. El horno se muestra en la siguiente imagen, a la izquierda, comparándose con un horno normal a la derecha.



**Ilustración 5.1.1-1. Horno utilizado para los ensayos (izquierda).**

Dentro del horno hay un termopar que indica la temperatura de éste. Otro termopar se sitúa en la pared interna del material y tres más se colocan en la pared externa del material. De este modo se obtienen las temperaturas a un lado y otro del material. Se utiliza un sistema de adquisición de datos Agilent 34920a y un software de HP Benchlink Data Logger, mostrados en la siguiente ilustración.



**Ilustración 5.1.-5-2: Sistema de adquisición de datos y hardware.**

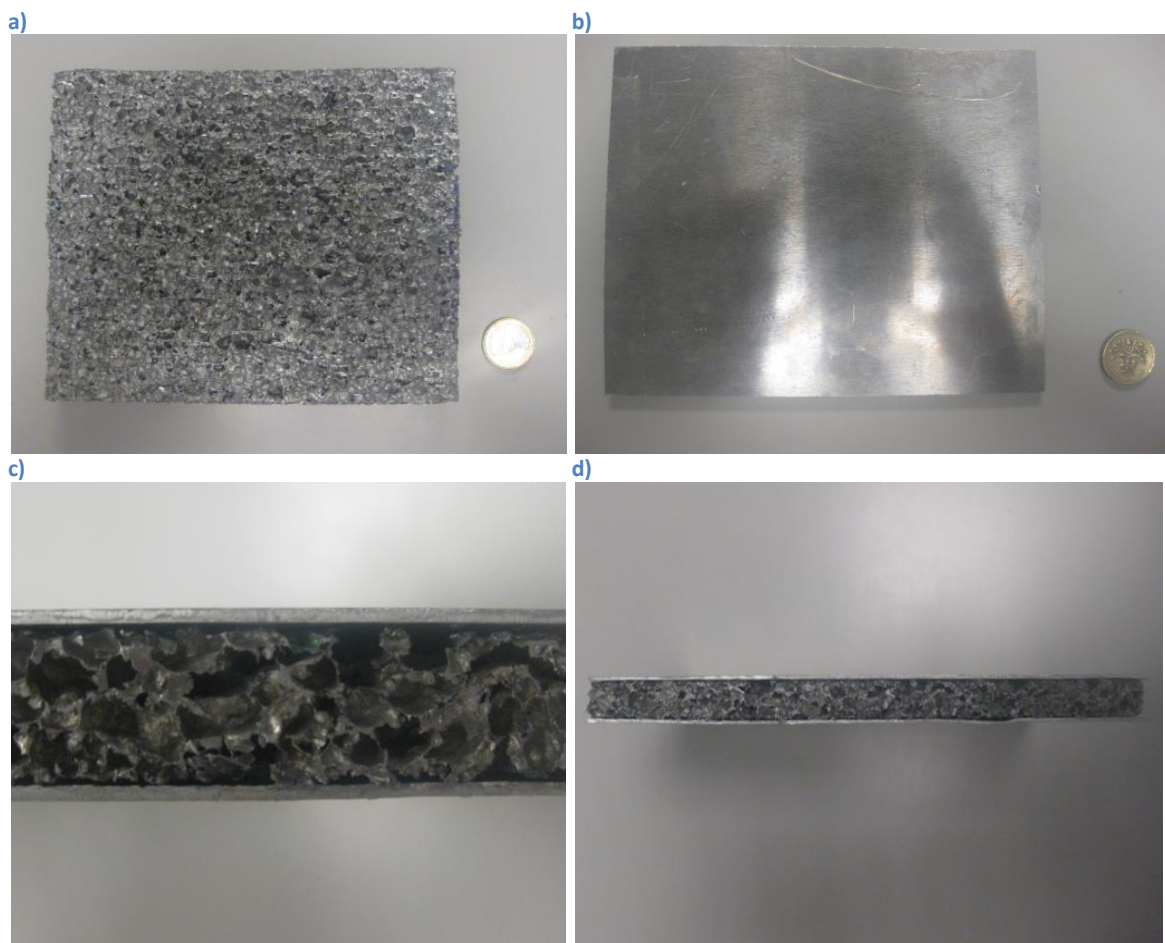
Julio 2014

Arriba a la derecha está el sistema de adquisición de datos obtenidos de los conectores donde van los terminales de los termopares (abajo a la izquierda). Estos datos son tratados y almacenados por el software mencionado.

Los materiales que se han estudiado son los siguientes (todos con unas dimensiones de 140x170mm, que es la dimensión del agujero en la puerta del horno).

- Espuma de aluminio de 10mm de espesor.
- Aleación de Aluminio 2024 de 6mm de espesor.
- Sándwich de espuma de aluminio (10mm) y láminas de aluminio (1mm), espesor total de 12mm.

**Tabla 5.1.1-1. Materiales Muestreados. a) Espuma de aluminio b) Aluminio c) Detalle del espesor del sándwich d) Vista en alzado del Sándwich**



La fabricación del Sándwich se realizó con resina epoxi. Se embadurnaron ambas caras de la espuma y se colocó el aluminio. Posteriormente fue necesario dejar el material bajo un peso dentro de un horno a 50°C. En la siguiente tabla se recogen las densidades de los materiales.

Tabla 5.1.1-1. Densidad de los materiales.

Material	Densidad [g/ cm <sup>3</sup> ]
Aluminio	2.64
Espuma de Aluminio	0.3
Sandwich de Aluminio	0.75

Para realizar el experimento es necesario preparar el montaje y encender el horno mucho tiempo antes de la medida, cerca de 4 horas antes. La temperatura del horno se establece en 400 grados centígrados, o lo que es lo mismo, 673.15 K. De este modo se asegura una estabilización del flujo de calor. Si no se hiciera de este modo las diferentes inercias térmicas de los materiales empleados podrían dar lugar a medidas incongruentes. Una vez estabilizadas todas las temperaturas, tanto en el horno como en ambas caras del material, se procede a la medida de las temperaturas. Así pues en este experimento no se pretende simular la problemática de un incendio en una aeronave, sino caracterizar los materiales y su comportamiento como aislantes ante elevadas temperaturas.

### 5.1.2. Cálculo del flujo de calor.

En el experimento tienen lugar tres fenómenos de transporte de calor, convección libre dentro del horno, conducción a través del material y radiación. La convección libre es aquella que tiene lugar debido al gradiente de temperaturas en un volumen de control, este da lugar cambios en la densidad del aire, cosa que implica un movimiento del mismo. Para el caso la radiación se ha obviado ya que afecta a todos los materiales objeto de estudio por igual. Dentro del material tiene lugar un proceso de convección. En la siguiente imagen se muestra un esquema simplificado de los fenómenos que tienen lugar.

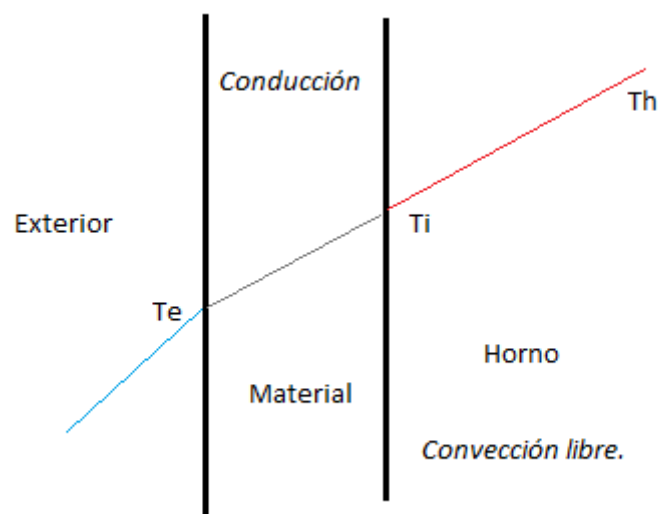


Ilustración 5.1.2-1. Esquema simplificado de los fenómenos del experimento.

Donde  $T_h$  es la Temperatura del horno,  $T_i$  la temperatura de la cara interior del material y  $T_e$  la temperatura de la cara exterior del material.

Así pues el flujo de calor al exterior será la suma del flujo de calor por convección más el de la conducción.

La conducción se modeliza mediante de *Ley de Fourier*:

$$\dot{q} = -kAgradT \quad (5.1.2-1)$$

Donde

- $\dot{q}$ , calor por unidad de tiempo [W]
- $A$ , área normal a la dirección del flujo de calor [m<sup>2</sup>]
- $k$ , conductividad térmica del material [W/mK]
- $gradT$ , gradiente de temperatura [K/m]

Asimismo, la convección se modeliza con la *Ley de Newton del Enfriamiento*.

$$\dot{q} = Ah\Delta T \quad (5.1.2-2)$$

Donde

- $\dot{q}$ , calor por unidad de tiempo [W]
- $A$ , área normal a la dirección del flujo de calor [m<sup>2</sup>]
- $h$ , coeficiente de transferencia de calor por convección o coeficiente de película [W/m<sup>2</sup>K]
- $\Delta T$ , diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido [K]

Por tanto, y para el problema resuelto, el flujo de calor al exterior queda de la siguiente forma:

$$\dot{q} = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{convecc} = \frac{(T_i - T_e)kA}{L} + (T_h - T_i)hA \quad (5.1.2-3)$$

Donde  $L$  es el espesor de cada uno de las placas objeto de experimento. El valor de la conductividad térmica se ha tomado de la bibliografía:

Material	k [W/mK]
Aluminio 2024	230
Espuma de Aluminio	16.9

Ilustración 5.1.2--3: Conductividad térmica de los materiales utilizados en el experimento.

Para calcular la conductividad térmica del sándwich basta con conocer las conductividades y espesores de cada uno de los materiales que lo forman, así como el área efectiva. De este modo se puede determinar la resistencia térmica a conducción del material compuesto:

$$R = \frac{L_{Al}}{k_{Al}A_{Al}} + \frac{L_{espuma}}{k_{Espuma}A_{Espuma}} \quad (5.1.2-4)$$

Conocida la resistencia térmica, la obtención del calor por conducción es trivial. Basta con dividir el incremento de temperaturas por la resistencia obtenida.

El valor del coeficiente de película también se ha tomado de literatura, para el caso del aire en convección libre un valor razonable es  $h = 10 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ .<sup>15</sup>

Antes de mostrar los resultados es necesario explicar la problemática que supone la medida de altas temperaturas con termopares

***Problemática encontrada: Medida de elevadas temperaturas con termopares.***<sup>16</sup>

Los termopares son el instrumento más extendido para la medida de temperatura debido a su bajo coste, sin embargo cuando se trata de medir en altas temperaturas presentan problemas que pueden dar lugar a errores en las medidas. Los errores se deben a que la temperatura en el sensor puede no ser la misma a la temperatura en el ambiente o material objeto de medida. Esto se debe a la transferencia de energía existente en la punta del termopar, la transferencia puede darse por convección, conducción o radiación. Los errores son atribuibles a variaciones en el ratio de transferencia de energía hasta la punta, variaciones de temperatura a lo largo de los cables que conforman el termopar e incluso reacciones catalíticas entre los metales del instrumento y los gases del medio.

Otro problema es la medida de temperaturas con aire fluctuante pues la transferencia de calor requiere un tiempo del que ocasiones no se dispone debido a las fluctuaciones del aire. Sería el caso por ejemplo de un incendio. Para evitar este tipo de errores se aconseja utilizar termopares pequeños, pues de este modo la transferencia de calor tardaría menos tiempo en realizarse.

Otras posibles soluciones serían el uso de escudos anti radiación con o sin succión de aire. Sin embargo este tipo de solución incrementaría tanto el coste como la complejidad del experimento.

Además, a la hora de medir temperaturas en la espuma de aluminio aumenta el error debido a la porosidad del material. Con el simple hecho de colocar un termopar en un poro más grande que otro la medida de temperatura podría verse alterada. Para subsanar este error se ha optado por la colocación de tres termopares en la superficie externa del material, de

<sup>15</sup> *Fundamentos de transferencia de calor*. Frank Incropera, Ed. Pearson.

<sup>16</sup> *A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments*. K.S. Shannon and B.W. Butler



Julio 2014

este modo realizando un promedio se pretende obtener un valor más preciso de la temperatura.

Conocidas las limitaciones que supone medir con termopares en ambientes de alta temperatura donde se va a dar lugar convección se procede a analizar los resultados obtenidos, donde las tendencias van a ser el referente de las conclusiones.

### 5.1.3. Resultados.

En las siguientes gráficas se muestran las temperaturas obtenidas mediante el sistema de adquisición para cada uno de los materiales. Donde se observan las tendencias. Como es lógico la mayor temperatura está en el horno y ésta va descendiendo, siendo menor en la capa interior y menor en la exterior.

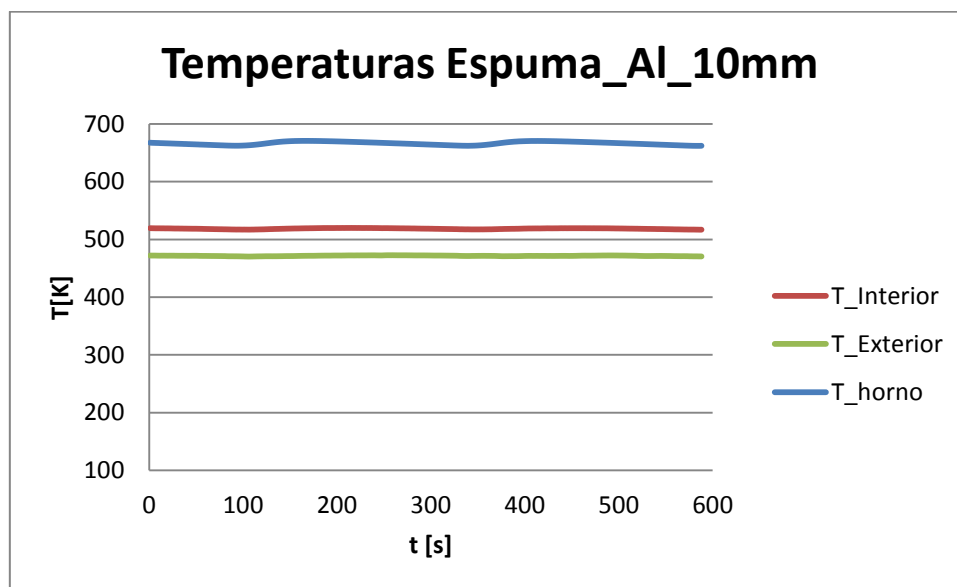


Ilustración 5.1.3-1. Temperaturas Espuma de Aluminio.

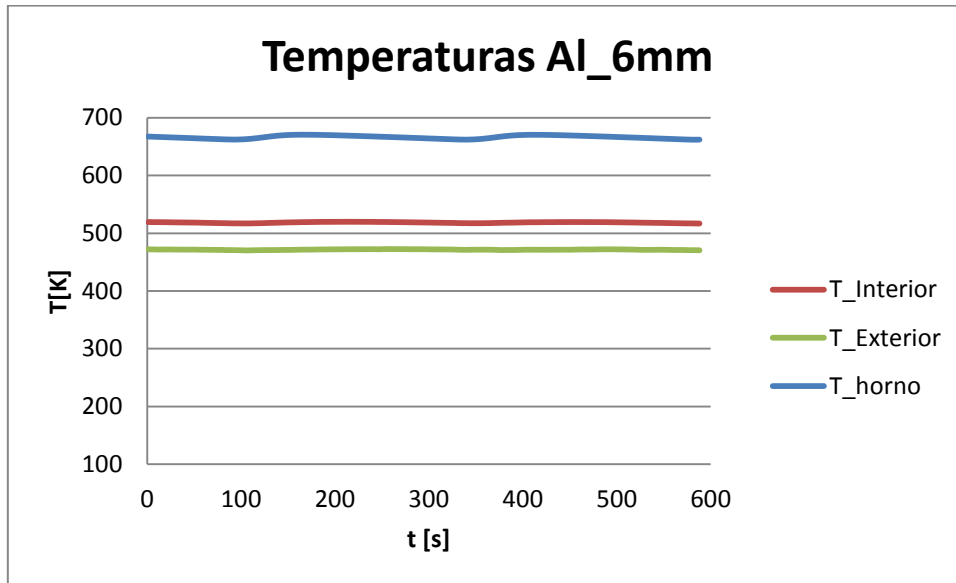


Ilustración 5.1.3-2. Temperaturas Aluminio.

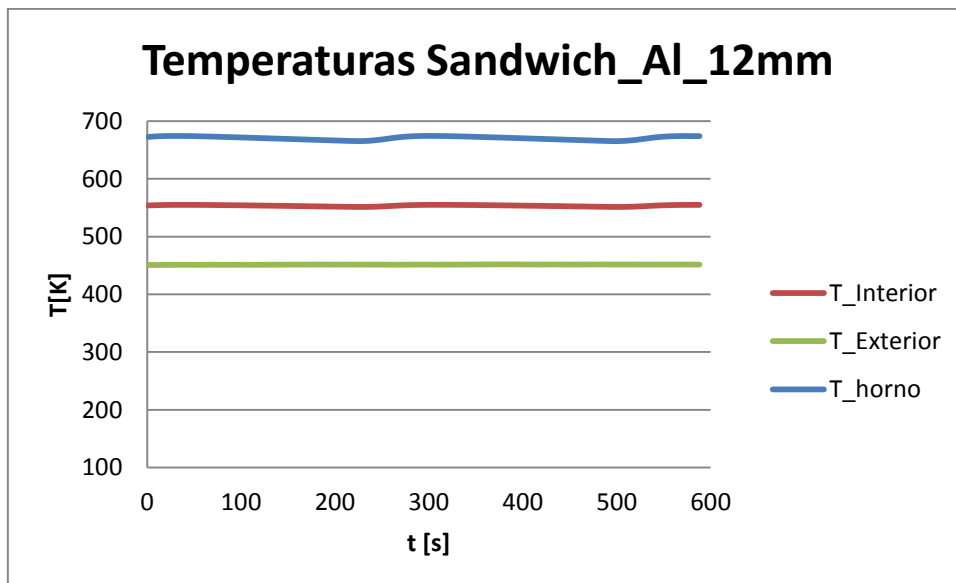


Ilustración 5.1.3-3. Temperaturas Sándwich de Aluminio y núcleo de espuma de Aluminio.

Para poder comparar los materiales se presentan las siguientes gráficas, con las temperaturas en cada posición para todos los materiales:

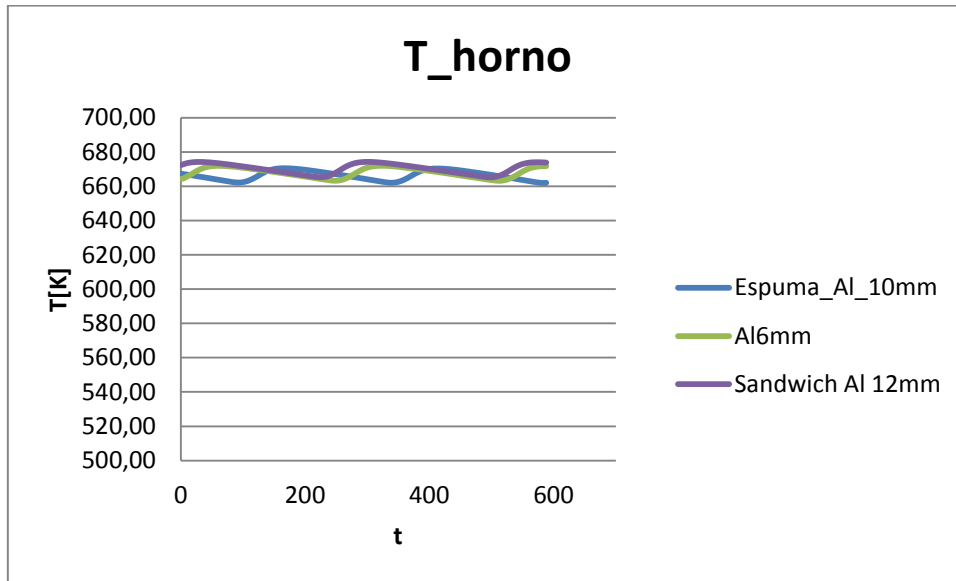


Ilustración 5.1.3-4. Temperaturas en el centro del horno.

En primer lugar se muestran las temperaturas del horno. Estas son las mismas para los tres casos porque son las temperaturas a la que se establece en horno. Se pueden observar oscilaciones en la temperatura que son debidas al sistema de regulación de temperatura inherente al horno, de esta gráfica se puede concluir que este sistema de control no es muy preciso.

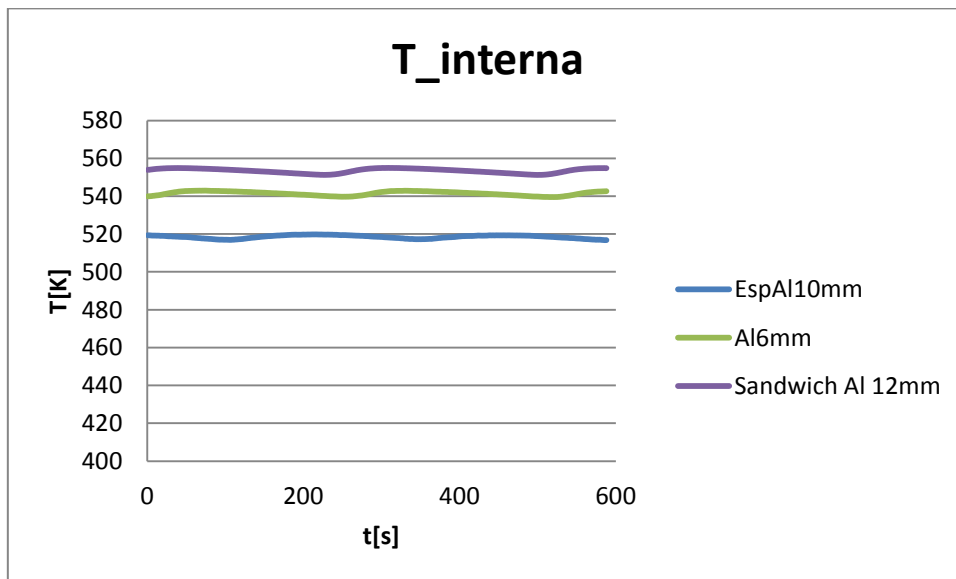


Ilustración 5.1.3-5. Temperaturas en la cara interna del material.

Las temperaturas en la cara interna del material difieren para cada uno de ellos. Esto se debe principalmente al coeficiente de película y a la conductividad del material. El coeficiente de película depende de la velocidad del flujo en la pared: cuando la pared es muy rugosa aumenta la verticalidad del flujo, esto hace que el fluido sea de carácter turbulento y su velocidad mayor. Por tanto el coeficiente de película se ve aumentado. Esto significaría una mayor transferencia de calor tal y como se ha mostrado con la ley de enfriamiento de Newton.

Julio 2014

No obstante la conductividad de la espuma de aluminio es muy baja comparada con la del aluminio, esto podría justificar que la temperatura alcanzada para ese material sea más baja, ya que el material no absorbe tanto calor y la punta del termopar está colocada sobre el mismo. Las temperaturas alcanzadas para el aluminio y el sándwich son bastante parecidas ya que la superficie de contacto es la misma, sin embargo la del Sándwich es un poco mayor, esto puede deberse a que la menor densidad del sándwich hace que su inercia térmica sea menor.

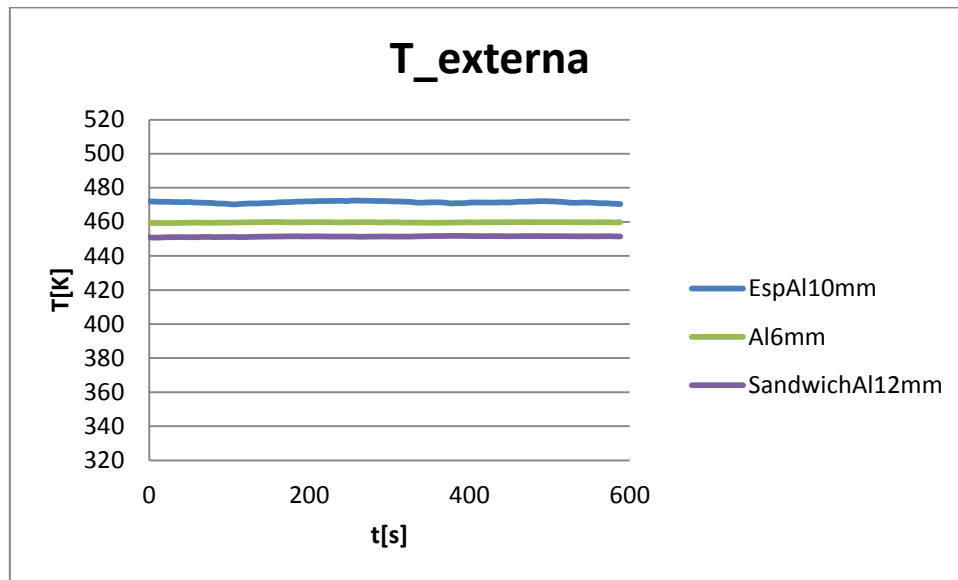


Ilustración 5.1.3-6. Temperaturas en la cara externa.

Conociendo las conductividades de los materiales se sabe que la transferencia de temperatura debería ser mayor para el aluminio, después para la espuma de aluminio y finalmente para el sándwich, puesto que tiene el mismo grosor que la espuma y además dos láminas de aluminio. Esa tendencia se cumple para el aluminio y el sándwich. No así para la espuma. La explicación de este extraño fenómeno recae en la dificultad de tomar medidas de temperatura, en concreto en materiales porosos. No es lo mismo colocar el termopar sobre el aluminio de la espuma que en un poro. Para el caso del sándwich y el aluminio los tres termopares externos pudieron colocarse en el mismo sitio, en ambos caso para garantizar una repetitividad. Además, dentro de los propios poros de la espuma estarán ocurriendo fenómenos de radiación que pueden distorsionar la medida en cada uno de los puntos. Es por eso que la medida de las temperaturas se desestima como dato fiable en el caso de la espuma. No obstante esto no es muy relevante puesto que la espuma de aluminio como tal no es un material que se vaya a utilizar en ingeniería aeroespacial. Siempre se utilizará en forma de Sándwich para cumplir los requerimientos estructurales necesarios del sector aeroespacial.

Para una lectura más clara de los datos se representan las diferencias de temperaturas alcanzadas en cada uno de los materiales

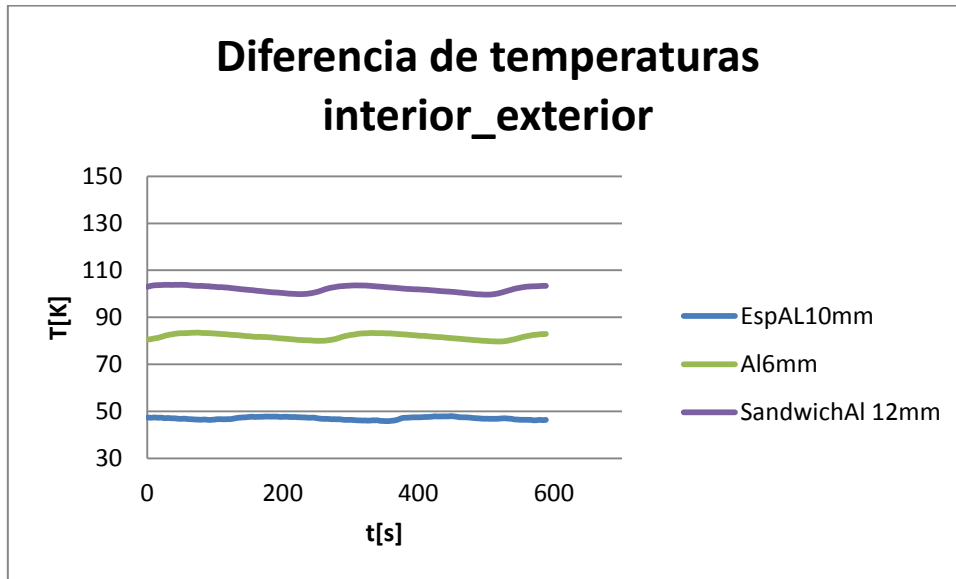


Ilustración 5.1.3-7. Diferencia de temperaturas entre la cara interna y externa de los materiales.

Como era de esperar la diferencia de temperaturas es mayor para el caso del sándwich que para el aluminio. Esto tiene sentido puesto que el primero aísla más, debido a dos motivos, su menor conductividad y su mayor espesor. Los datos de la espuma de aluminio se han desestimado por causas ya expuestas, sin embargo es interesante representarlos, la temperatura interna y externa apenas difieren. Esto puede deberse a la poca masa de la espuma, ya que una masa más elevada es capaz de absorber mejor las temperaturas. Otra vez se incide en la necesidad de utilizar la espuma de aluminio como núcleo en un sándwich.

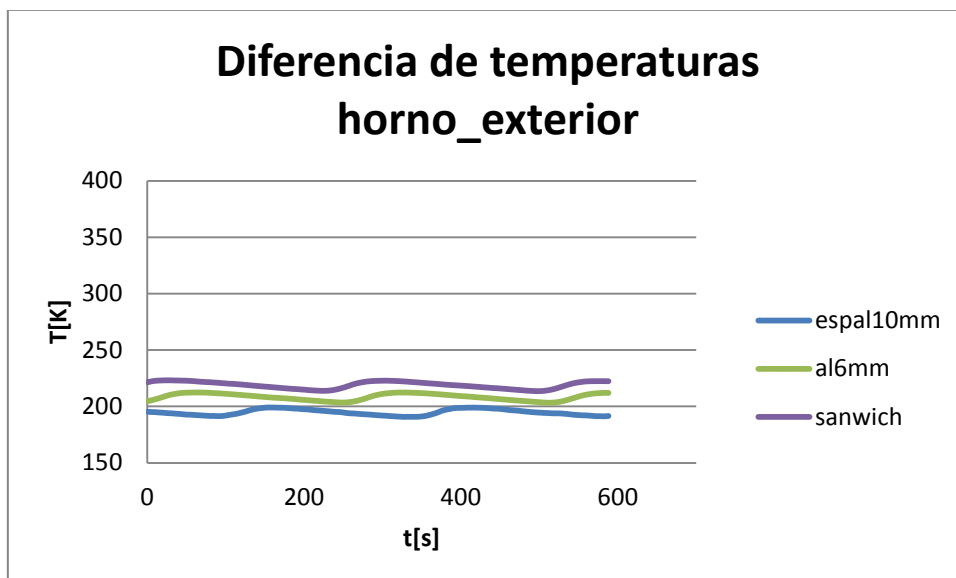


Ilustración 8. Diferencia de temperaturas horno - pared exterior.

La misma tendencia se observa si se compara la diferencia de temperaturas entre el horno y la pared exterior del horno.

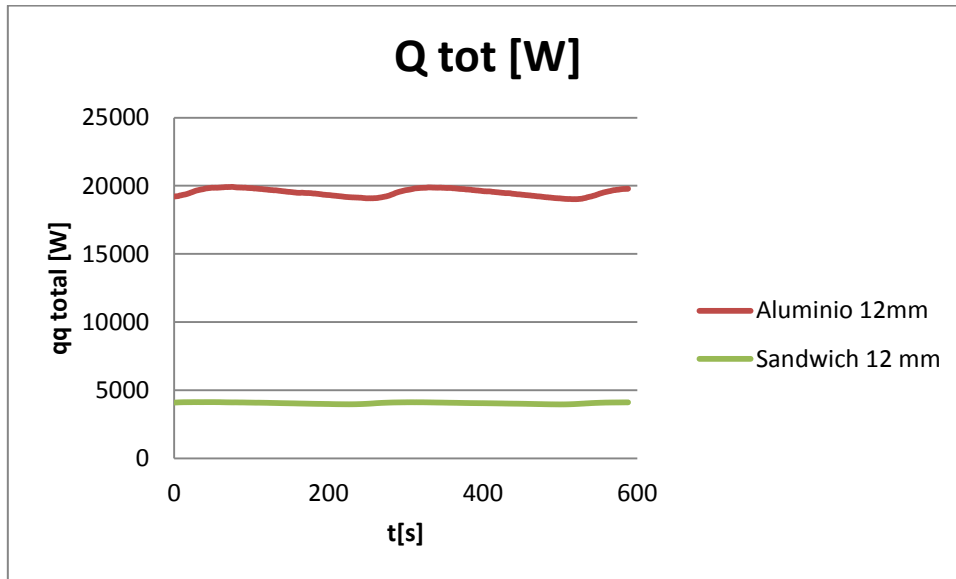


Ilustración 5.1.3-9. Calor total que atraviesa los materiales.

Para el cálculo del flujo de calor se ha desestimado la medida de la espuma de aluminio por los motivos ya expuestos y se ha supuesto un espesor del aluminio igual al del sándwich, ya que la relación entre la conductividad y el espesor puede asumirse lineal. Con el procedimiento explicado en el apartado anterior se ha calculado el flujo de calor. Obviamente el aluminio permite atravesar a una mayor cantidad de calor, cosa que lo haría perjudicial frente a un incendio, puesto que no aislaría muy bien a los componentes del otro lado de la pared. Se observa que para el sándwich de aluminio este flujo es mucho menor, circunstancia que lo convierte en un excelente aislante en cuanto a transferencia de calor.

#### 5.1.4. Conclusiones

De este estudio se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar la dificultad existente a la hora de tomar medidas de temperaturas. Este es un tema muy controvertido sobre el cual hay amplia literatura, ya que ¿cómo se puede medir la temperatura correctamente si es una variable inventada? Además, los termopares no son el método más fiable, el uso de unos termorresistores habría mejorado la medida, pero se ha optado por los termopares puesto que son el transductor más ampliamente utilizado debido a su bajo precio. Como ya se ha explicado el hecho de trabajar a elevadas temperaturas también aumenta el error.

A pesar de la problemática que implica la medida de temperaturas, se han podido obtener tendencias que conducen a la siguiente conclusión: La espuma de aluminio posee muy baja conductividad debido a su elevada porosidad, ya que la conductividad térmica del aire es mucho más baja que la del aluminio. Además se pueden añadir paneles de aluminio para formar un sándwich sin perder estas propiedades y consiguiendo una mejora de las propiedades mecánicas.

Así pues, para aislar determinadas zonas de la aeronave podrían utilizarse sándwiches de aluminio, de este modo se aseguraría una menor transmisión de calor ante un posible incendio, o ante una fuente de calor habitual (motores, APUs). Además esto supondría una disminución del peso de la aeronave si se sustituyen metales, así como un coste mucho más reducido si se sustituyen materiales compuestos.

## **5.2. Exposición a llama y ensayo de flexión.**

El objetivo de este experimento es doble. Los materiales objeto de estudio se expondrán a la llama de un soplete. Por un lado, se tomarán medidas de temperatura en el material para constatar su transmisión de calor en una situación “más real”. En segundo lugar se realizará un ensayo a flexión para comprobar la pérdida de propiedades mecánicas de los materiales tras la exposición a una llama.

### **5.2.1. Exposición a llama. Introducción y montaje.**

En este experimento se pretende conseguir una situación más realista de lo que sucedería en un avión en un incendio. Es por ello que el experimento consiste en la exposición directa del material a una llama. La medida de temperaturas se realiza durante los 10 primeros minutos de exposición, mediante el mismo sistema de adquisición de datos del experimento anterior. Se toma este rango de medidas y no se espera a una estabilización de las temperaturas ya que en un incendio en una aeronave los primeros minutos son muy importantes para la supervivencia, y la degradación de los materiales será un indicador de la misma. Cuanto menos cambien las propiedades mecánicas de un material mejor será su comportamiento en caso de incendio.

Para el montaje se ha tomado como referencia la normativa determinada en la FAR 25.853<sup>17</sup>. Un experimento para determinar la resistencia al fuego de materiales en cabina. Dado que los materiales objeto de ensayo en esta normativa son inflamables se ha optado por aumentar el tiempo de ensayo, conservando las características básicas del ensayo.

---

<sup>17</sup> FAR, “Federal Aviation Regulation”



Ilustración 5.2.1-1. Soplete centrado bajo material a ensayar.



Ilustración 5.2.1-2. Llama del experimento



Ilustración 5.2.1-3. Aluminio siendo expuesto a la llama.

La llama de exposición (5.2.1-2) tenía una longitud específica de aproximadamente 68 mm, era una llama estabilizada con un dosado cercano a 1 .



Julio 2014

Se tomaron tres medidas de temperatura en el experimento, un termopar se coloca en el centro de la placa, otro al extremo y el último entre medias de ambos, quedando entre ellos a una distancia de 4 centímetros aproximadamente.

### 5.2.2. Exposición a llama. Resultados y conclusiones.

A continuación se ofrece una presentación de los datos obtenidos para las tres temperaturas en los tres materiales.

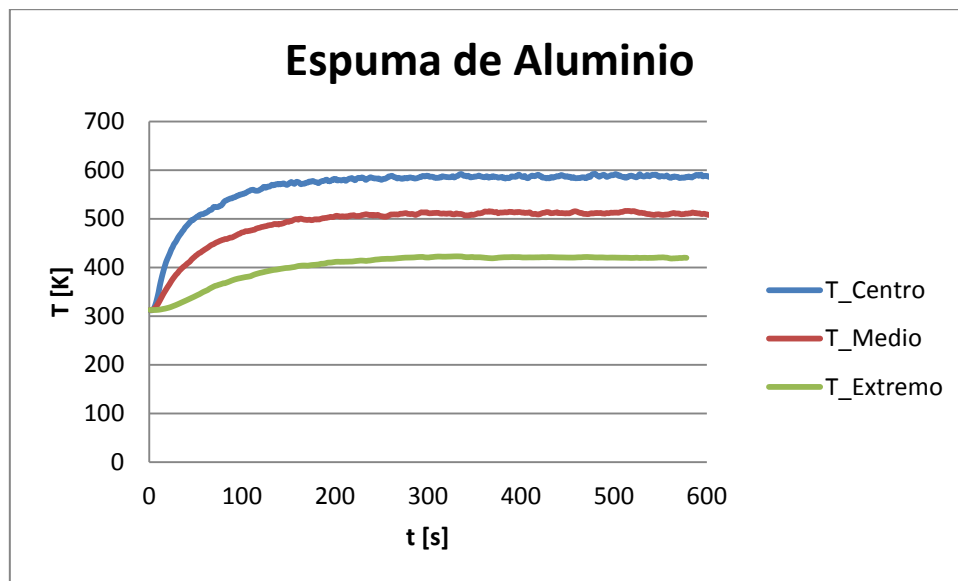


Ilustración 5.2.2.-1 Temperaturas en la espuma de aluminio.

La espuma de aluminio muestra unos resultados claros, es un material que se estabiliza muy rápidamente, para el caso de la llama se estabiliza en aproximadamente 250 segundos. Esto es un indicativo de que la inercia térmica del material es muy baja, es decir, el material no tiende a conservar la temperatura a la que se encuentra ante cambios de la temperatura ambiente. La inercia térmica se define de la siguiente manera:

$$I = \sqrt{k C \rho}$$

Donde k es la conductividad térmica, C la capacidad calorífica específica y  $\rho$  la densidad. Es por eso que las temperaturas se estabilizan tan rápido en la espuma de aluminio, porque su conductividad térmica y densidad son muy bajas. Tal y como se expondrá a continuación esta estabilización es un fenómeno que no tiene lugar para el aluminio y el sándwich de aluminio.

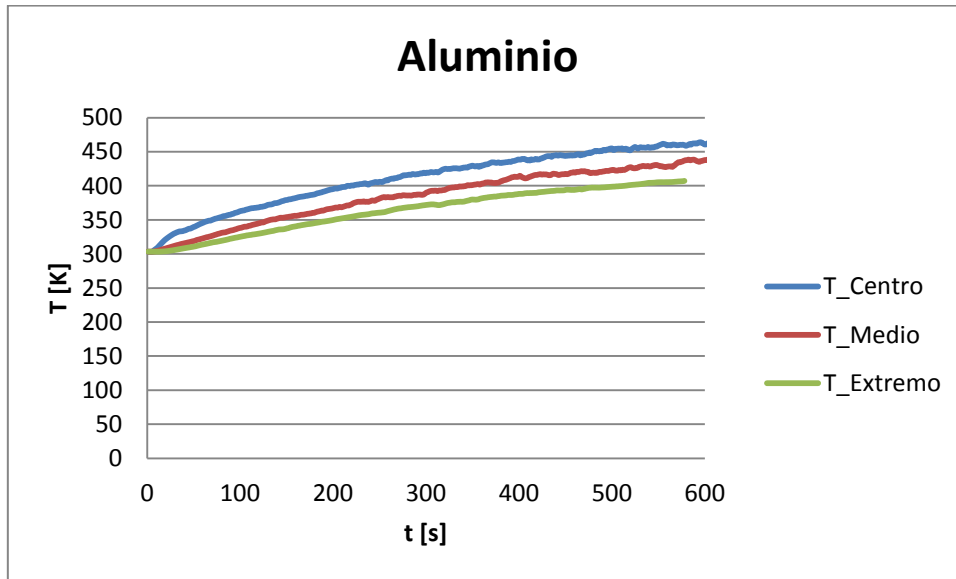


Ilustración 5.2.2.-2. Temperaturas aluminio.

En el caso del aluminio no se alcanza una estabilización en las temperaturas ya que su inercia térmica es mucho mayor que en el caso de la espuma, también se observa cómo las temperaturas están mucho más cercanas entre sí debido a la elevada conductividad del material.

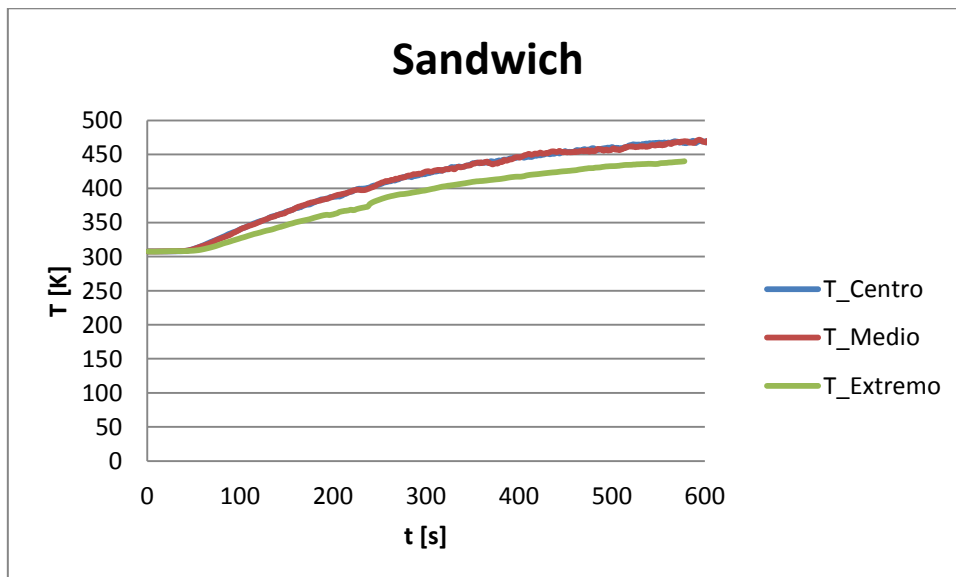


Ilustración 5.2.2.-3. Temperaturas sandwich de aluminio.

El último caso es el del sándwich, las temperaturas en el centro y el medio son prácticamente iguales, lo que puede deberse a la elevada conductividad del recubrimiento de aluminio. Sin embargo no se puede descartar la posibilidad de que sea un error de termopar. No obstante la tendencia se conserva ya que la temperatura es menor en el extremo.

A continuación se representan conjuntamente las temperaturas de una misma posición para los tres materiales

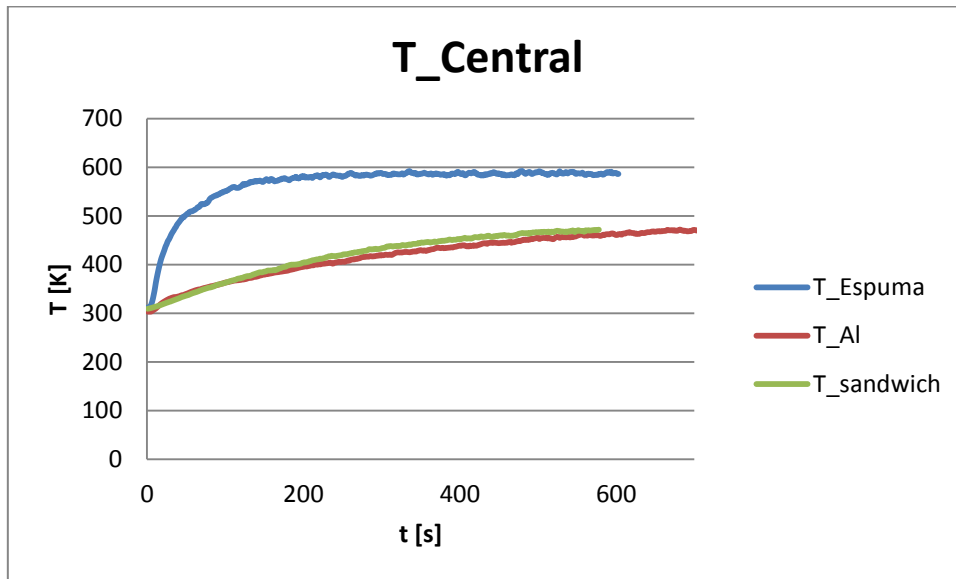


Ilustración 5.2.2-4. Comparación temperaturas del termopar central.

Las temperaturas van a la par para el sándwich y el aluminio, ya que se está midiendo sobre el mismo material, que es el aluminio. Como ya se ha explicado la espuma alcanza una temperatura mayor debido a su baja inercia térmica.

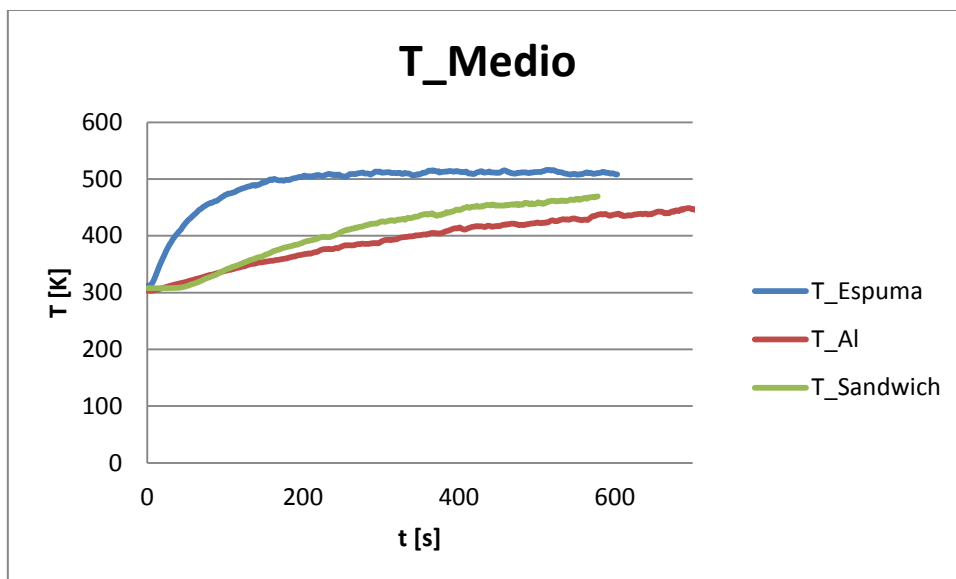


Ilustración 5.2.2-5. Comparación temperaturas del termopar medio.

Al analizar la gráfica del termopar medio se aprecia que las temperaturas son más próximas entre ellas debido a la conductividad en la superficie de medida del aluminio.

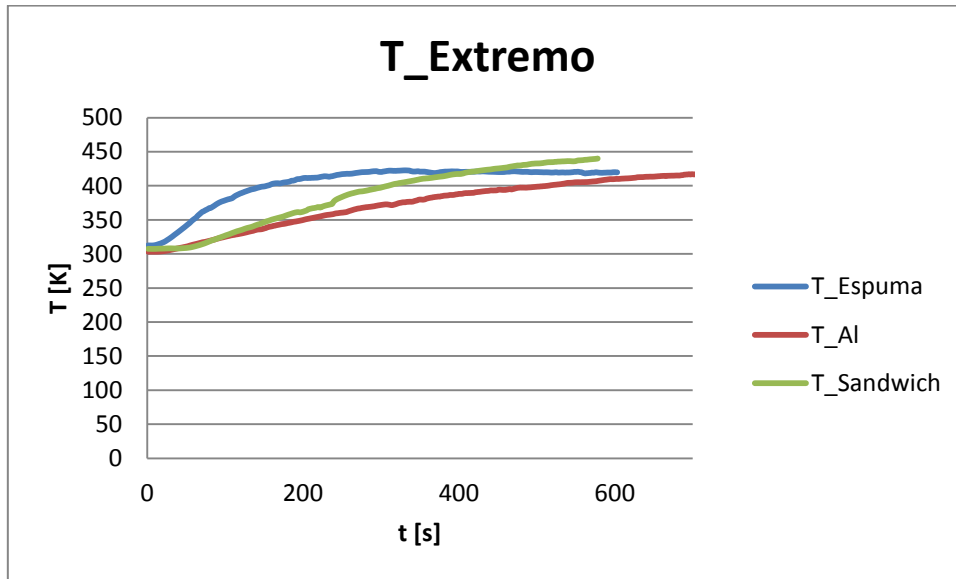


Ilustración 5.2.2-6. Comparación temperaturas del termopar central.

Las medidas obtenidas en el extremo son las más bajas en los tres casos, por la tendencia se aprecia que tras una exposición más prolongada se alcanzarían más temperaturas en el caso del sándwich y del aluminio que en la espuma.

Tras el daño realizado a los materiales tras su exposición a elevadas temperaturas y a llama se procede a realizar un estudio de la pérdida de propiedades mecánicas, en este caso la pérdida de resistencia a flexión.

### 5.2.3. Ensayo de flexión. Introducción y montaje.

Uno de los principales peligros que conlleva un incendio es la pérdida de integridad estructural de los materiales expuestos al fuego. Mediante este ensayo se pretende caracterizar la pérdida de resistencia a flexión de los materiales ensayados. Se utilizan los materiales empleados en el experimento anterior.

Para realizar el ensayo es necesario preparar las probetas. Se van a ensayar seis muestras, dos de cada uno de los materiales. Las placas expuestas al fuego son de 175x140 mm, se cortan dos tiras de 20mm de ancho, una del extremo y otra del centro, es decir, el lugar que ha estado en contacto directo con la llama. De este modo no sólo se podrá determinar la pérdida de resistencia a flexión, sino que se podrá comprobar la degradación del material expuesto.



**Ilustración 5.2.3-5-10** Probetas a ensayar, de izquierda a derecha aluminio, espuma de aluminio y sandwich.

Las probetas tienen una altura de 140 mm, ancho de 20mm y espesor de 6mm para el aluminio, 10 para la espuma de aluminio y 12 para el sándwich. En la superficie de la espuma de aluminio se pueden apreciar muchas rugosidades y un acabado irregular. Esto se debe a los poros de la espuma, al cortar una probeta tan pequeña se forman “cavidades”.

Para el montaje de los ensayos es necesario el uso de aparatos específicos. El ensayo se realiza mediante una máquina “INSTRON 4204”, ( ilustración 5.2.3-3). Y un sistema de adquisición de datos especial ( ilustración 5.2.3-2) “INSTRON”. Los datos serán procesados en un ordenador y posteriormente tratados para su análisis.



Ilustración 5.2.3-2. Sistema de toma de medidas.



Ilustración 5.2.3-3. Aparato de ensayo a flexión.

Las probetas se colocan tal y como se muestra en la ilustración 5.2.3-4. Centrada y con un espaciado entre los dos apoyos de 80mm. Los apoyos de abajo son fijos y el superior es móvil. El experimento consiste en asignar una fuerza de aplicación, en este caso de 45kN. Al

Julio 2014

encender la maquinaria el apoyo móvil comienza a bajar ( Ilustración 5.3.3-5). El experimento continúa hasta conseguir una flecha de 10mm, es decir, un descenso de la parte de arriba de la probeta de 10mm. Los datos se registran y almacenan hasta que la maquinaria para. Los datos determinaran una sucesión de puntos fuerza-deformación. A partir de estos datos podrán obtenerse valores de propiedades mecánicas de flexión.



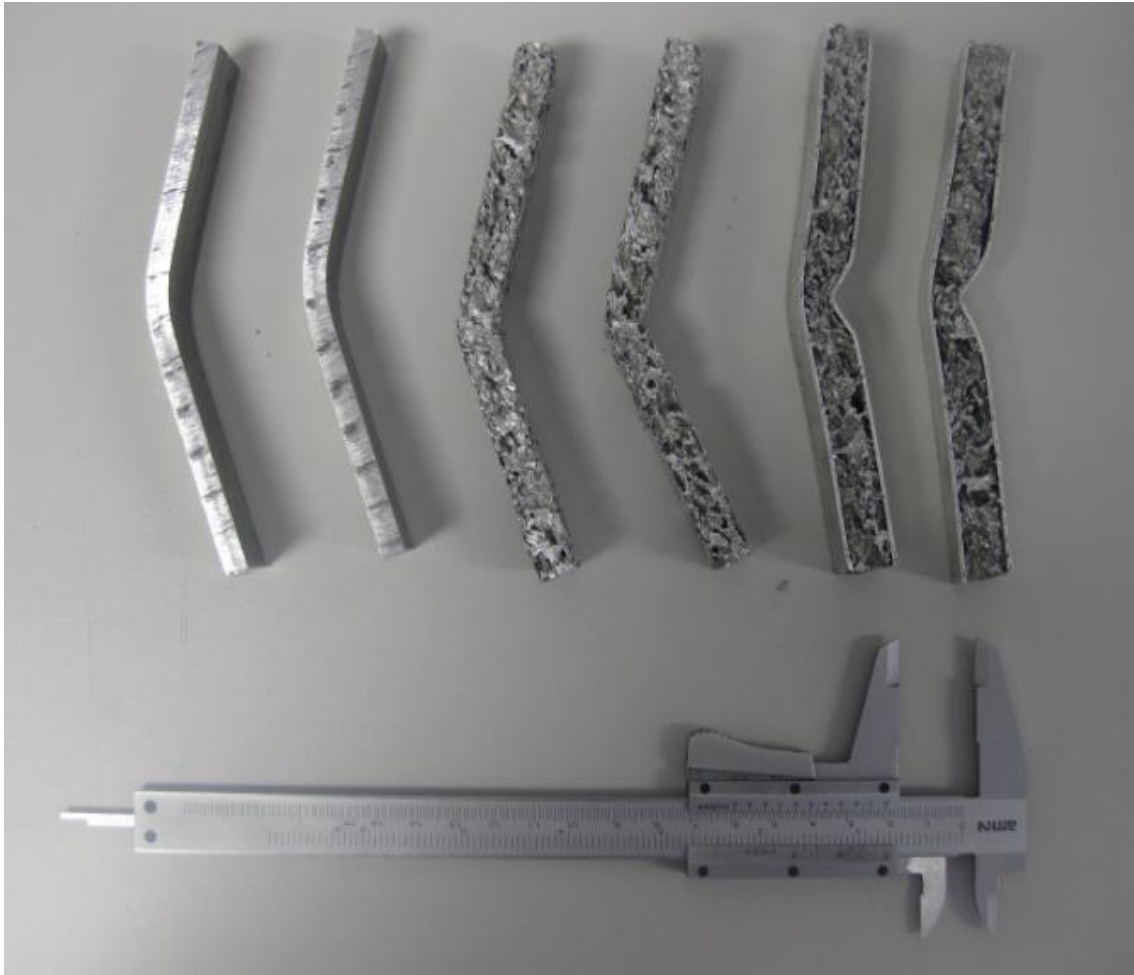
Ilustración 5.2.3-4. Colocación de la probeta, distancia entre los apoyos de 80mm.



Ilustración 5.2.3-5. Instantánea durante el ensayo.

#### 5.2.4. Ensayo de flexión. Resultados y conclusiones.

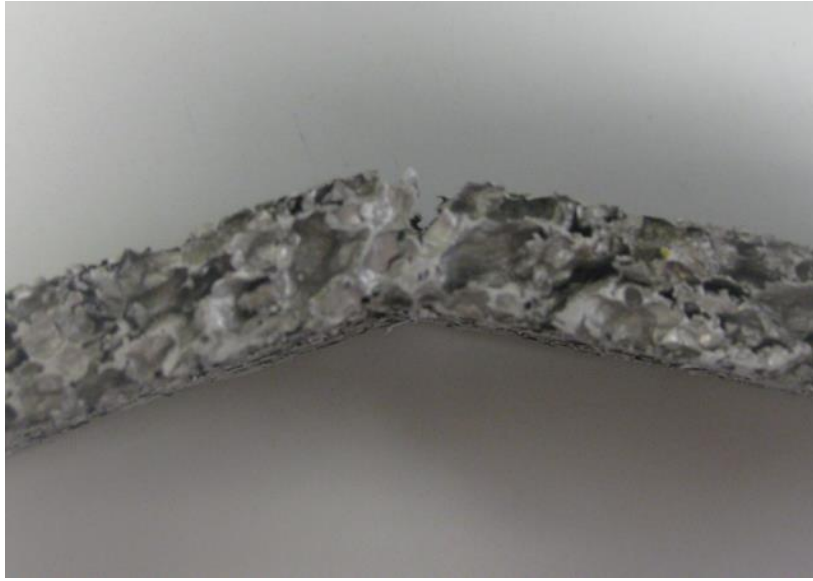
Los resultados se muestran de dos formas, mediante la observación de las probetas ensayadas se puede conocer el comportamiento de los materiales y mediante las gráficas y cálculos se conocen las características mecánicas de los mismos.



**Ilustración 5.2.4-5-1. Resultado final de las probetas ensayadas. De izquierda a derecha, aluminio, espuma de aluminio y sándwich. DE cada pareja la probeta de la izquierda es la lateral y la de la derecha la central.**

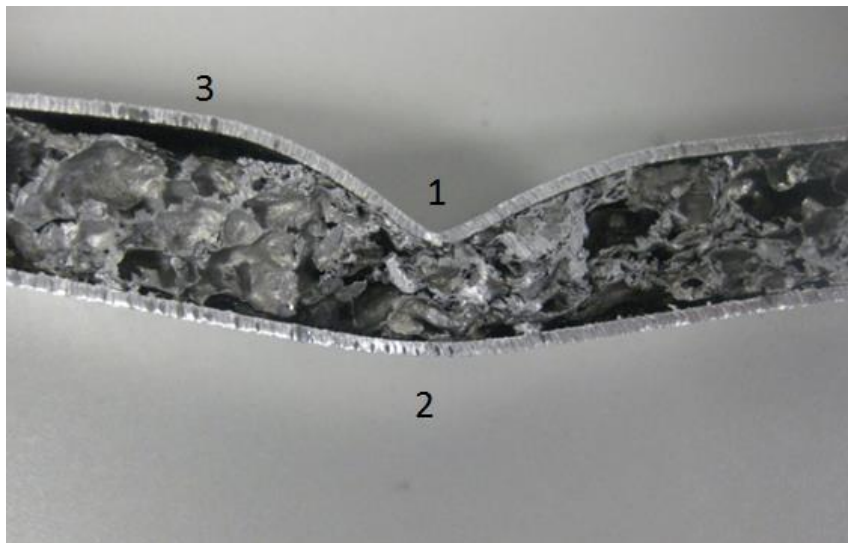
Se observa muy bien cómo la cara no expuesta del sándwich se deforma mucho menos que los otros materiales. El aluminio ha fallado a flexión y la espuma también, a pesar de su rotura debido a los poros del material. El fallo del sándwich se estudiará a continuación.





**Ilustración 5.2.4.-2. Detalle del inicio de fractura de la espuma de aluminio.**

Para la espuma de aluminio este ensayo no es muy esclarecedor puesto que la presencia de tantos poros y tan aleatorios hace que se pueda fracturar por diferentes partes cada vez, dependiendo de la posición de los huecos más grandes.



**Ilustración 5.2.4-3. Detalle de la probeta de sándwich ensayada.(1) Indentación. (2) Flexión. (3) Lámina de aluminio despegada.**

La rotura de esta lámina de sándwich resulta muy interesante, dado que se pueden observar tres fenómenos. En primer lugar la rotura tuvo lugar por indentación del núcleo. Es decir la lámina superior del sándwich se hundió en el núcleo. Este fenómeno depende de algunos factores, tales como el radio del aparato, la separación de los apoyos... El segundo fenómeno que ocurre es la flexión de la parte de debajo de la lámina. Cuando la espuma deja de absorber la energía y no puede comprimirse más los esfuerzos se transmiten al aluminio, que comienza a fallar por flexión.

El tercer fenómeno que se observa en la probeta es la separación de la lámina en el extremo superior izquierdo. Este fenómeno sólo ha ocurrido en la probeta central del sándwich y se debe al comportamiento de la resina epoxi. Al exponerla a elevadas temperaturas se quema, ya que su temperatura máxima de operación es de alrededor de 500K<sup>18</sup>. La conclusión directa extraíble de esto es que en aplicaciones antiincendio los sándwiches han de estar unidos mediante otras técnicas, tales como soldadura por ejemplo. Esto aumentaría el coste ya que la fabricación sería más complicada.

A continuación se muestran las curvas de fuerza- flecha obtenidas en el ensayo de flexión para las seis probetas.

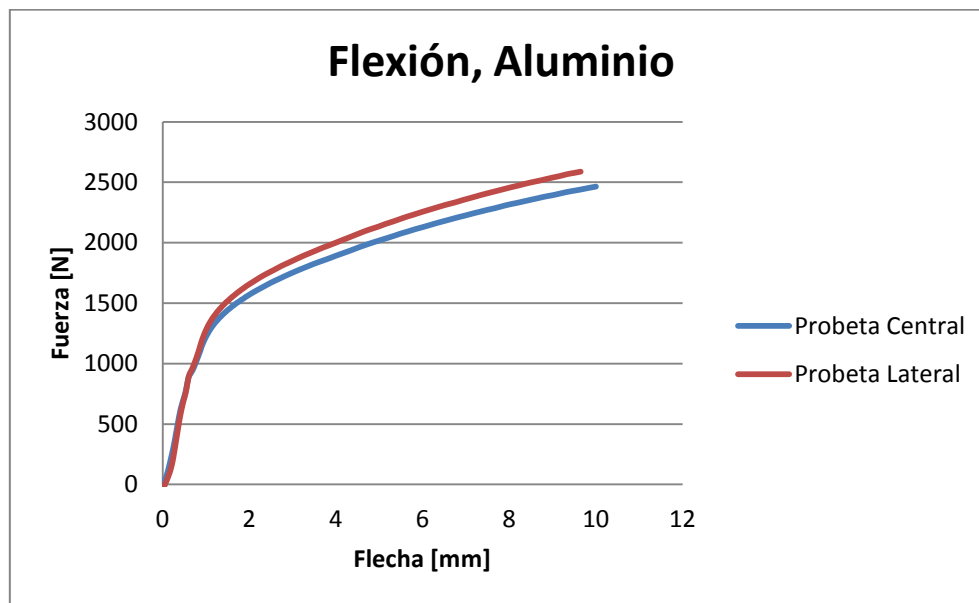


Ilustración 5.2.4-4. Curvas de flexión obtenidas para el aluminio.

En el caso del aluminio se comprueba cómo para la probeta expuesta directamente a la llama la resistencia a flexión disminuye. La fuerza máxima que puede soportar el aluminio expuesto a la llama es menor que el aluminio que no estaba en contacto directo con el fuego. Esta tendencia se observa igual en todos los materiales ensayados. A partir de la tensión máxima, es decir, el punto en que se pierde el carácter lineal de la curva, el material deja de comportarse adecuadamente y cada vez está más cerca de la rotura.

<sup>18</sup> Technical Data Sheet RT323

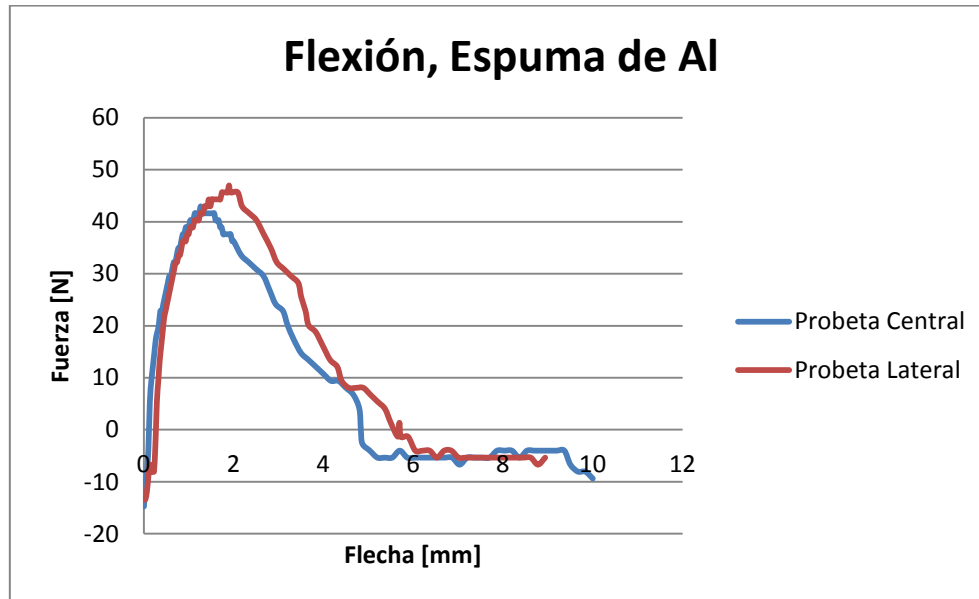


Ilustración 5.2.4-5. Curvas de flexión obtenidas para la espuma de aluminio

Para la espuma de aluminio se observan varias cosas, en primer lugar la fuerza capaz de soportar es mucho menor que para el aluminio, como era de esperar, puesto que es un material mucho menos rígido. El límite elástico se alcanza en el máximo de las curvas representadas. En este caso se alcanza el fallo del material, indicado por el descenso de la curva. Una conclusión importante de este ensayo es que la espuma de aluminio no se comporta tan bien a elevadas temperaturas como se presenta en literatura, puesto que sí ha perdido propiedades mecánicas tras la exposición a una llama.

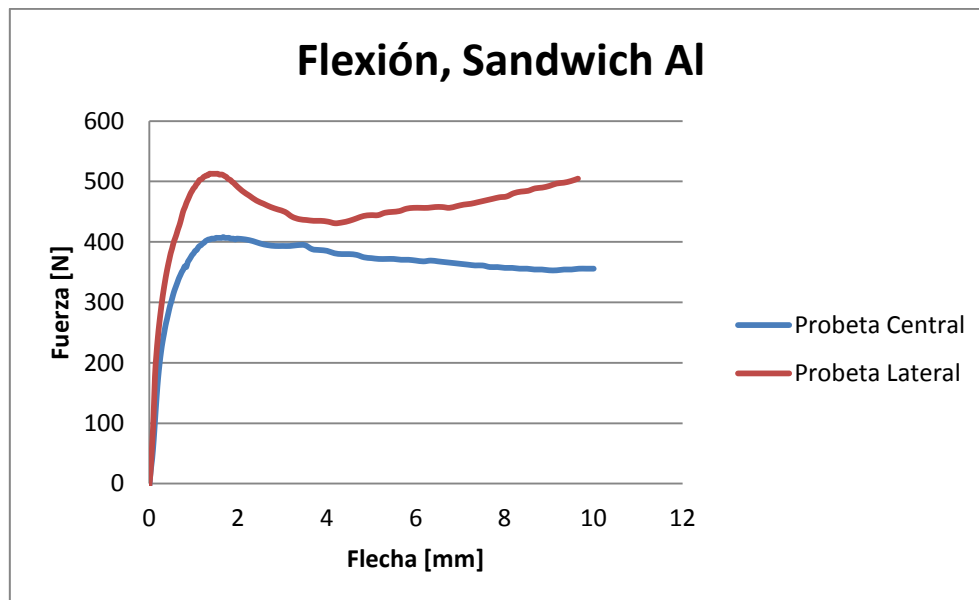


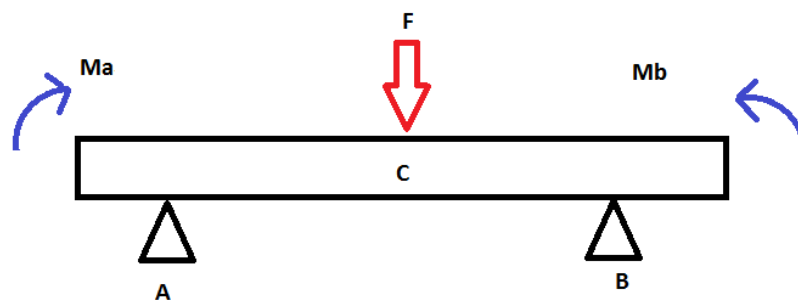
Ilustración 5.2.4-6. Curvas de flexión obtenidas para el Sándwich de aluminio

En el sándwich se observa la misma tendencia que ya se ha comentado, la probeta central ha perdido mayor resistencia a flexión que la lateral. Además en este caso se pueden extraer conclusiones interesantes. En el caso de la probeta lateral se observa un aumento de la

Julio 2014

fuerza tras un pequeño descenso. Este se debe al modo de fallo de sándwich. El primer descenso corresponde con la indentación una vez comprimida la espuma hasta el máximo entre en juego la flexión de la lámina inferior de aluminio, lo que explica el aumento de la curva de nuevo, puesto que aún no se ha alcanzado el límite a flexión de la lámina. Esto no sucede de este modo para la probeta central ya que está más dañada por el fuego.

Para abarcar las pérdidas de resistencia a flexión que puede implicar la exposición a una llama se ha calculado la tensión de deformación límite y el módulo de Young de las probetas. Esto se ha hecho mediante las fórmulas de momento de inercia de un rectángulo, y tensión, que se define como el momento que en los apoyos por la distancia del punto de presión hasta las fibras externas y dividido por el momento de inercia. De teoría de vigas conocemos se obtiene el siguiente diagrama:



5-2-4.7 Esquema de fuerzas y momentos en la probeta.

La distancia AB es L (80mm), por tanto cada momento equivale a un medio de la fuerza aplicada por un medio de L. Así pues las fórmulas necesarias quedarán como sigue:

Momento de Inercia: 
$$I = \frac{bd^3}{12} \quad (5.2.4.1)$$

Tensión máxima: 
$$\sigma = \frac{3FL}{2bd} \quad (5.2.4.2)$$

Módulo de Young: 
$$E = \frac{(0.5F - 0.2F)L^3}{48I(0.5w - 0.2w)} \quad (5.2.4.3)$$

Siendo

$b$ : anchura de la probeta [m].

$d$ : espesor de la probeta [m].

$L$ : espaciado entre los puntos de apoyo [m].

$F$ : Fuerza máxima soportada[N].

$w$ : flecha [m].

La ecuación del módulo de Young se ha sacado del *ASTM<sup>19</sup>: E 855 – 90" Standard Test Methods for Bend Testing of Metallic Flat Materials for Spring Applications Involving Static Loading<sup>1"</sup>*<sup>20</sup>. En esta norma se determina que para obtener el módulo de Young se ha de tomar un punto al 20% de la carga límite y otro al 50% de la misma. De este modo se garantiza que se está trabajando en la zona lineal del material. Con los datos de fuerza y flecha de esos se calcula del módulo de Young tal y como se muestra en la ecuación 5.2.4.3.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.2.4-1. Resultados de las propiedades elásticas de los materiales ensayados.

Material	Probeta	Fuerza máxima [N]	Tensión límite [Mpa]	Módulo Young [Gpa]	Momento de inercia [m <sup>4</sup> ]
Aluminio	Central	1277	212.83	54.49	3.6*10 <sup>-10</sup>
	Lateral	1410	235	59.74	
Espuma de Aluminio	Central	42.95	2.57	0.45	1.66*10 <sup>-9</sup>
	Lateral	46.97	2.818	0.5	
Sándwich	Central	406.68	16.94	3.92	2.88*10 <sup>-9</sup>
	Lateral	512.72	21.36	4.069	

La comparación para cada material es clara: la probeta central siempre presenta peores resultados en cuanto a pérdida de propiedades de resistencia a flexión. La pérdida porcentual de módulo de elasticidad es menor para el sándwich y la espuma. En el aluminio se pierde un 8,78% de módulo de Young, y en el sándwich solamente un 3,4%. En cuanto a la tensión límite la pérdida de esta propiedad para el aluminio y el sándwich se debe al sobrevejecimiento causado por elevadas temperaturas. Se observa que la tensión límite apenas varía en el caso de la espuma, esto significa que la espuma de aluminio no sobrevejece a la misma temperatura que el aluminio y por tanto aguanta mejor las elevadas temperaturas.

El hecho de que los espesores sean diferentes para cada material hace que no sea posible comparar el parámetro de la fuerza, sin embargo el módulo de Young y la tensión elástica límite pueden compararse, ya que son propiedades constantes dentro de cada material e independientes del espesor. Esto quiere decir que si se ensaya un mismo material con diferentes espesores la curva obtenida tendrá la misma pendiente en el tramo lineal.

<sup>19</sup>ASTM: American Section of the International Association for Testing Materials

<sup>20</sup> Métodos Standard de tests para ensayos de flexión de materiales metálicos.

Estos son los valores adimensionales fruto de todas las comparaciones:

$$\frac{E_{Al_{central}}}{E_{espuma_{central}}} = 130.4 \quad (5.2.4.4)$$

$$\frac{E_{Al_{central}}}{E_{sandwich_{central}}} = 15.2 \quad (5.2.4.5)$$

$$\frac{E_{sandwich_{central}}}{E_{espuma_{central}}} = 8.57 \quad (5.2.4.6)$$

$$\frac{E_{Al_{lateral}}}{E_{espuma_{lateral}}} = 108,76 \quad (5.2.4.7)$$

$$\frac{E_{Al_{lateral}}}{E_{sandwich_{lateral}}} = 13.39 \quad (5.2.4.8)$$

$$\frac{E_{sandwich_{lateral}}}{E_{espuma_{lateral}}} = 8.12 \quad (5.2.4.9)$$

Estos parámetros determinan una relación de las rigideces. Si se comparan las relaciones entre el aluminio y el sándwich se comprueba cómo esta relación no se mantiene constante para las probetas centrales y laterales. La relación disminuye como un indicativo de que el aluminio pierde más rigidez que el sándwich tras una exposición a elevadas temperaturas. Lo mismo sucede con el aluminio y la espuma. Por último al comparar la relación entre el sándwich y la espuma se aprecia cómo no varía tanto, señal de que las altas temperaturas afectan aproximadamente por igual al sándwich que a la espuma. Este resulta beneficioso ya que se han aumentado las propiedades mecánicas de la espuma sin perder las propiedades térmicas del núcleo.

También puede hacerse un estudio de valores específicos, es decir, por unidad de masa, para averiguar cuánto ahorro de peso supondría el uso de sándwiches en lugar de láminas de aluminio.

Material	Probeta	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Masa [kg]	Fuerza máx específica [N/kg]	Tensión límite específica [MPa/kg]
Aluminio	Central	1.68*10 <sup>-5</sup>	2640	0.044352	28622	4770
	Lateral				31603	5267.1
Espuma de Aluminio	Central	2.8*10 <sup>-5</sup>	330	0.00924	4648.26	278.89
	Lateral				5083.33	305
Sándwich	Central	3.36*10 <sup>-5</sup>	740	0.024864	20620.97	859.2
	Lateral				16356.17	681.507

A continuación se muestran las relaciones entre las tensiones y las tensiones específicas.

Julio 2014

$$\frac{\sigma_{Al_{central}}}{\sigma_{espuma_{central}}} = 82.5 \qquad \frac{\sigma_{especificaAl_{central}}}{\sigma_{especificaespuma_{central}}} = 17.1 \qquad (5.2.4.10-a-b)$$

$$\frac{\sigma_{Al_{central}}}{\sigma_{sandwich_{central}}} = 12.5 \qquad \frac{\sigma_{especificaAl_{central}}}{\sigma_{especificasandwich_{central}}} = 7 \qquad (5.2.4.11-a-b)$$

$$\frac{\sigma_{sandwich_{central}}}{\sigma_{espuma_{central}}} = 6.5 \qquad \frac{\sigma_{especificasandwich_{central}}}{\sigma_{especificaespuma_{central}}} = 2.4 \qquad (5.2.4.12-a-b)$$

$$\frac{\sigma_{Al_{lateral}}}{\sigma_{espuma_{lateral}}} = 83.4 \qquad \frac{\sigma_{especificaAl_{lateral}}}{\sigma_{especificaespuma_{lateral}}} = 17.2 \qquad (5.2.4.13-a-b)$$

$$\frac{\sigma_{Al_{lateral}}}{\sigma_{sandwich_{lateral}}} = 11 \qquad \frac{\sigma_{Al_{lateral}}}{\sigma_{especificasandwich_{lateral}}} = 6.1 \qquad (5.2.4.14-a-b)$$

$$\frac{\sigma_{sandwich_{lateral}}}{\sigma_{espuma_{lateral}}} = 7.6 \qquad \frac{\sigma_{sandwich_{lateral}}}{\sigma_{especificaespuma_{lateral}}} = 2.8 \qquad (5.2.4.15-a-b)$$

La relación entre las tensiones límite indica cuánto aguanta un material más que otro a flexión, en este caso no hay tanta diferencia entre las probetas centrales y laterales como se observaba para el módulo de Young. No obstante el análisis de las tensiones específicas límite es muy interesante, puesto que vemos que esta relación disminuye notablemente. La relación entre las tensiones específicas del aluminio y el sándwich se reduce a la mitad de la relación entre las tensiones. La conclusión que se obtiene de este estudio es que es necesario buscar un compromiso entre propiedades elásticas y peso, puesto que un pequeño sacrificio de estas propiedades puede suponer un ahorro importante de peso.





## 6. Conclusiones.

La mejora en la seguridad de las aeronaves es necesaria para favorecer la supervivencia en caso de accidente. Hoy en día, la utilización de nuevos materiales, con capacidad de resistencia mejorada respecto a materiales tradicionales, constituye una de las vías de investigación tendente a la disminución de los riesgos

Del estudio estadístico realizado se concluye que el fuego es un elemento muy peligroso, especialmente si es oculto, lo cual incide en una necesidad de reforzar el mantenimiento de las aeronaves, así como en la importancia de mejorarlas para aumentar el tiempo de supervivencia.

El presente proyecto ha estudiado el comportamiento de diferentes materiales, aluminio, espuma de aluminio y sándwich de aluminio, bajo condiciones variables de esfuerzo y temperatura, a pesar de la dificultad que entraña medida de temperatura, especialmente cuando ésta es muy elevada.

En cuanto a los ensayos realizados se pueden extraer varias conclusiones:

El aluminio es muy buen material pero tiene defectos en cuanto a aplicaciones antiincendios, puesto que sobrevejece muy pronto perdiendo propiedades estructurales rápidamente. Este problema no lo presenta la espuma de aluminio, si bien sus propiedades estructurales son mucho más bajas en condiciones normales. La principal ventaja que aporta el uso de espuma de aluminio es la ligereza, puesto que su densidad es muy baja. Si bien este material se oferta como un material al que no afectan las altas temperaturas de hemos podido comprobar que no es así, puesto que sufre pérdidas de resistencia elástica, si bien no tan elevadas como las del aluminio. Por lo que la elección de uno u otro material se ha de realizar, dependiendo de la aplicación, en función de las relaciones entre peso añadido, propiedades estructurales y resistencia a elevadas temperaturas.

Para mejorar las bajas propiedades mecánicas de la espuma de aluminio, se propone el uso de sándwich de aluminio. Este material sea ensayado en laboratorio obtenido resultados satisfactorios para flujos de calor. Por tanto sería una buena idea utilizarlo como mamparo de protección de elementos cuya temperatura es muy elevada, ya que el flujo de calor que lo atraviesa es muy bajo comparado con metales no porosos. Una posible aplicación sería el aislamiento de cargos peligrosos.

Si una aeronave sufre un impacto y sus tanques están debidamente protegidos y son capaces de soportar este impacto entonces la probabilidad de que se dé un incendio post-accidente disminuye drásticamente.

Así pues, a pesar de sus limitaciones, el sandwich de aluminio es un material que tiene una proyección en la ingeniería, no sólo en aeronáutica, sino en automoción o balística. Sus

Julio 2014

propiedades mecánicas bajas, hacen que no pueda ser utilizado en elementos sometidos a grandes tensiones, pero su buena respuesta al impacto, su ligereza y elevada capacidad ignífuga lo convierten en un material ideal para elementos tales como mamparos cortafuegos en cabina o recubrimientos de tanques de fuel.

## 7. Glosario.

**Age-Hardening.** Envejecimiento térmico, deposición de fases metaestables en forma finamente divididas, de forma que se crea una barrera contra los movimientos de las dislocaciones. Aumenta la dureza y resistencia de las aleaciones.

**APU (Auxiliar Power Unit).** Motor que actúa como fuente de energía para la aeronave.

**Austenita:** fase del hierro o acero con una estructura cristalina de cara centrada en cubo.

**Corrosión.** Deterioro de un material como consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

**Ductilidad:** Propiedad bajo la cual los materiales pueden ser sometidos a una fuerza y deformarse plásticamente sin llegar a romperse.

**Dureza de fractura.** Energía absorbida por unidad de área antes de que fracture el material ( $J/m^2$ ).

**Dureza.** Oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como penetración, abrasión, rayado...

**Esfuerzo a compresión.** Máxima tensión mecánica que un material puede soportar a compresión (MPa).

**Flashover:** condición atmosférica en un volumen cerrado en que la temperatura o presión son tan elevadas que una pequeña chispa hace que todo el volumen de control se encuentre en llamas.

**Flecha.** Desplazamiento vertical de una viga sometida a un esfuerzo de flexión.

**Fuerza elástica.** Máxima carga elástica que un material puede soportar antes de fallo.

**Glare.** Vidrio reforzado. Material formado por capas finas de aluminio intercaladas con capas de fibra de vidrio impregnadas en resina epoxi.

**Límite de fatiga.** Máxima tensión mecánica que puede soportar un material bajo una carga cíclica. (MPa).

**Martensita:** Fase microestructural del acero formada por un mecanismo de cortante sin difusión cuando el material es enfriado rápidamente desde la fase austenítica. El enfriamiento rápido retiene el carbono es una solución sólida supersaturada de hierro tetragonal centrado en el cuerpo.

**Peso específico.** Peso por unidad de volumen.

**PH, Precipitation-Hardening, endurecimiento por precipitación:** Desarrollo de obstáculos al movimiento de las dislocaciones (y, por tanto, incremento de la dureza) mediante la precipitación controlada de las segundas fases.

Julio 2014

**Resiliencia.** Habilidad de un material de absorber energía cuando se deforma elásticamente (MPa).

**Tensión de fluencia.** Tensión soportable antes de la cual un material sufra deformaciones elásticas irreversibles.

**Tensión de rotura.** Tensión a tracción que puede soportar un material antes de comenzar a estrecharse significativamente.

**Tensión última de rotura.** Tensión bajo la cual el material se rompe a tracción

**Termopar.** Transductor formado por la unión de dos metales distintos los cuales producen una diferencia de potencial que varía en función de la temperatura.

**TNS:** Tiempo de No supervivencia. Es el tiempo que transcurre desde que se detecta un problema o fallo en una aeronave hasta que las posibilidades de supervivencia de los pasajeros son nulas.

**UTS, Ultimate Tensile Strength.** Término inglés para referirse a la Resistencia elástica.

## 8. Bibliografía.

- **Parte del Fuego.**
  - ❖ Información sobre accidentes aéreos: <http://aviation-safety.net/database/>
  - ❖ <http://www.misextintores.com/lci/tetraedro-del-fuego>
  - ❖ 3.3 Dessault Falcon accidente <http://www.tc.gc.ca/eng/civilaviation/publications/tp13549-chapter1-2366.htm>
  - ❖ U.S. Department of Transportation. FAA. Advisory circular. Subject: in-flight fire.
  - ❖ <http://flightsafety.org/>
  - ❖ [www.faa.gov](http://www.faa.gov)
  - ❖ [http://www.skybrary.aero/index.php/Main\\_Page](http://www.skybrary.aero/index.php/Main_Page)
  - ❖ <http://flighttraining.aopa.org/students/flighttestprep/skills/fire.html>
  - ❖ “NFPA 402: Guía para Operaciones de Rescate y Combate de Incendios en Aeronaves.”
  - ❖ “Problemas de Ingeniería del Mantenimiento”. Peidro, Tormos, Olmeda. Editorial UPV.
  - ❖ <http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles>
    - “Fire Protection: Engines and Auxiliar Power Units.” Hariram, Philipp & Dummeyer.
    - “Fire Protection. Passenger Cabin.” Tutso, Ferguson & Maden.
  
- **Parte de Materiales**
  - ❖ “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones”. Gutiérrez y Oñoro. 2008
  - ❖ “Fire and Smoke-Resistant Interior Materials for commercial Transport Aircraft”  
Committee on Fire and Smoke Resistant Materials for Commercial Aircraft Interiors,  
Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council.
  - ❖ “Fire-Resistant Materials: Research Overview”. 1997
  - ❖ “Reinforced aluminium foams.” Simancik, Lucan and Jerz. Institute of Materials and  
Machine Mechanics, SAS, Bratislava, Slovak Republic
  - ❖ “Aerospace Materials”. Institute of physics. Cantor, Assented, Grant.
  - ❖ “Introduction to Aerospace Materials” Adrian P. Mouritz.
  - ❖ Aleaciones de aluminio del A380
    - <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=227>
  - ❖ “Aluminium foam. TALAT Lecture 1410” Dr. Ing. Catrin Kammer, Goslar, Germany.
  - ❖ “Fire-Resistant Materials: Research Overview.” DOT/FAA/AR-97/99
  
- **Parte Experimental**
  - ❖ “Fundamentos de transferencia de calor”. Frank Incropera, Ed. Pearson.
  - ❖ “A review of error associated with thermocouple temperature measurement in fire environments.” K.S. Shannon and B.W. Butler
  - ❖ “Horizontal Bunsen Burner Test for Cabin, Cargo Compartment, and Miscellaneous Materials. “



# DOCUMENTO II: Pliego de condiciones.

## Contenido

1. Ordenanzas generales de la seguridad e higiene en el trabajo. ....	70
1.1. Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores. ....	71
1.2. Artículo 2: Seguridad estructural. ....	71
1.3. Artículo 3: Superficies y cubicación. ....	72
1.4. Artículo 4: Suelos, techos y paredes. ....	72
1.5. Artículo 5: Disposiciones generales. ....	72
1.6. Artículo 6: Iluminación de emergencia. ....	73
1.7. Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad. ....	73
1.8. Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones. ....	74
1.9. Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos. ....	74
1.10. Artículo 10: Electricidad estática. ....	75
1.11. Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables. ....	76
1.12. Artículo 12: Prevención y extinción de incendios. ....	77

## **1. Ordenanzas generales de la seguridad e higiene en el trabajo.**

En el apartado que a continuación se desarrolla se detallan los artículos pertenecientes a la normativa de las ordenanzas de seguridad e higiene en el trabajo que se han de tener en cuenta para la realización del presente proyecto.

### **1.1. Artículo 1: Obligaciones y derechos de los trabajadores.**

Incumbe a los trabajadores, la obligación de cooperar en la prevención de riesgos profesionales en la empresa y el mantenimiento de la máxima higiene en la misma, a cuyos fines deberán cumplir fielmente los preceptos de esta Ordenanza y de sus instrucciones complementarias, así como las órdenes e instrucciones, que a tales efectos les sean dados por sus superiores.

Los trabajadores, expresamente, están obligados a:

- Recibir las enseñanzas sobre materia en Seguridad e Higiene y sobre salvamento y socorrismo en los centros de trabajo que les sean facilitados por la empresa o en las instrucciones del Plan Nacional.
- Usar correctamente los medios de protección personal y cuidar de su perfecto estado de conservación.
- Dar cuenta inmediatamente a sus superiores de las averías y las deficiencias que puedan ocasionar peligros en cualquier centro o puesto de trabajo.
- Cuidar y mantener su higiene personal para evitar enfermedades contagiosas o molestias a los compañeros de trabajo.
- Someterse a los reconocimientos médicos preceptivos y vacunaciones o inmunizaciones ordenados por las Autoridades Sanitarias competentes o por el Servicio Médico de las Empresas.
- No introducir bebidas u otras sustancias no autorizadas en los centros de trabajo. Tampoco se podrá presentar o permanecer en los mismos en estado de embriaguez o de cualquier otro género de intoxicación.
- Cooperar en la extinción de siniestros y en el salvamento de las víctimas de accidentes de trabajo en las condiciones que, en cada caso, fueren racionalmente exigibles.
- Todo trabajador, después de solicitar de su inmediato superior medios de protección personal de carácter preceptivo para la realización de su trabajo, queda facultado para demostrar la ejecución de éste, en tanto no le sean facilitados dichos medios, si bien deberá dar cuenta del hecho al Comité de Seguridad e Higiene o a uno de sus compañeros, sin perjuicio, además de ponerlo en conocimiento de la Inspección Provincial de Trabajo.

### **1.2. Artículo 2: Seguridad estructural.**



Julio 2014

Todos los edificios permanentes o provisionales, serán de construcción segura y firme para evitar riesgos de desplome y los derivados de los fenómenos atmosféricos. Por este motivo los cimientos, pisos y demás elementos de los edificios ofrecerán resistencia suficiente para sostener y suspender con seguridad, las cargas para los que han sido calculados.

Además, para preservar esta seguridad, se indicará por medio de rótulos o inscripciones las cargas que los locales pueden soportar o suspender, quedando totalmente prohibido sobrecargar los pisos y plantas de los edificios.

### **1.3. Artículo 3: Superficies y cubicación.**

Los locales de trabajo reunirán las siguientes condiciones mínimas:

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos para cada trabajador.

No obstante, en los establecimientos comerciales, de servicios y locales destinados a oficinas y despachos la altura a que se refiere el apartado 1 podrá quedar reducida hasta 2.5 m., pero respetando la cubicación que se establece en el tercer apartado y siempre que el aire se renueve suficientemente.

Para el cálculo de la superficie y el volumen, no se tendrá en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales.

### **1.4. Artículo 4: Suelos, techos y paredes.**

El pavimento constituirá un conjunto homogéneo, llano y liso, sin soluciones de continuidad; será de material consistente, no resbaladizo o susceptible de serlo con el uso y además de fácil limpieza. Estará al mismo nivel, y de no ser así, se salvarán las diferencias de altura por medio de rampas con pendientes no superiores al 10%.

Por otro lado, tanto los techos como las paredes, deberán reunir las condiciones suficientes para resguardar a los trabajadores de las inclemencias del tiempo. Si han de soportar o suspender cargas deberán reunir las condiciones que se establezcan para estos en el artículo segundo.

### **1.5. Artículo 5: Disposiciones generales.**

Todos los lugares de trabajo o tránsito tendrán iluminación natural, artificial o mixta, pero en cualquier caso apropiado a las operaciones que en ellos se esté realizando. Aunque la luz, como se acaba de comentar puede ser natural o artificial, se intentará en la medida de lo posible que ésta sea natural.

Se deberá intensificar la iluminación en máquinas peligrosas, lugares de tránsito con riesgo de caídas, escaleras y salidas de urgencia.

### **1.6. Artículo 6: Iluminación de emergencia.**

En todos los centros de trabajo, se dispondrá de medios de iluminación de emergencia adecuados a las dimensiones de los locales y al número de trabajadores ocupados simultáneamente, capaces de mantener al menos durante una hora la intensidad de cinco luxes y mediante una fuente de energía que será independiente del sistema normal de iluminación.

### **1.7. Artículo 7: Ventilación, temperatura y humedad.**

En los lugares de trabajo y sus anexos se mantendrá, por medios naturales o artificiales, unas condiciones atmosféricas adecuadas, evitando el aire viciado, exceso de calor o de frío, humedad o sequía y los olores desagradables.

En ningún caso, el anhídrido carbónico ambiental, podrá sobrepasar la proporción de 50/10000, y el monóxido de carbono, la de 1/10000.

En los locales de trabajo cerrados, el suministro de aire fresco y limpio por hora y por trabajador, será al menos de 30 metros cúbicos, salvo que se efectúe una renovación total del aire varias veces por hora, no inferior a seis veces para trabajos sedentarios, ni a diez veces para trabajos que exijan un esfuerzo físico superior al normal. En el otro extremo, la circulación de aire en locales cerrados se acondicionará de modo que los trabajadores no estén expuestos a corrientes molestas y que la velocidad del aire no exceda de 15 metros por minuto con temperatura normal, ni de 45 metros por minuto en ambientes extremadamente calurosos.

En los centros de trabajo expuestos a altas y bajas temperaturas, serán evitadas las variaciones bruscas por el medio que se considere más eficaz. Cuando la temperatura sea extremadamente distinta entre los lugares de trabajo, deberán existir locales de paso para que los operarios se adapten gradualmente de unas condiciones a las otras.

De acuerdo con todo lo anterior, se fijan como límites de temperatura y humedad en locales y para los distintos trabajos, siempre que el procedimiento de fabricación lo permita, los siguientes:

- Para trabajos sedentarios: de 17 a 22 °C.
- Para trabajos ordinarios: de 15 a 18 °C.
- Para trabajos que exija acusado esfuerzo muscular: de 12 a 15 °C.

A pesar de estas limitaciones, todos los trabajadores estarán debidamente protegidos contra las irradiaciones directas y excesivas de calor. La humedad relativa de la atmósfera

Julio 2014

oscilará del 40 al 60 %, salvo en instalaciones que haya peligro de generarse electricidad estática, en cuyo caso este valor se deberá limitar necesariamente por debajo del 50 %.

En aquellos trabajos, en los que por exigencias del proceso los locales están sometidos a un calor o frío extremo, se eliminará la permanencia de los operarios estableciendo, en cada caso, los turnos adecuados.

### **1.8. Artículo 8: Ruidos, vibraciones y trepidaciones.**

Los ruidos y vibraciones se evitarán o reducirán en la medida de lo posible en su foco de origen, tratando de aminorar su propagación en los locales en lo que se encuentren personas trabajando.

De esta forma, el anclaje de las máquinas y aparatos que produzcan ruidos, vibraciones y trepidaciones se realizarán con las técnicas más eficaces, a fin de lograr su óptimo equilibrio estático y dinámico, tales como bancadas cuyo peso sea superior entre 1.5 y 2.5 veces el peso de la máquina que soportan, por aislamiento de la estructura general o por otros recursos técnicos.

Además del anclaje, las máquinas que produzcan ruidos o vibraciones molestas se aislarán adecuadamente y en el recinto de aquellas, sólo trabajará el personal para su mantenimiento durante el tiempo indispensable.

Se extremará el cuidado y mantenimiento de las máquinas u aparatos que produzcan vibraciones molestas o peligrosas a los trabajadores y muy especialmente los órganos móviles y los dispositivos de transmisión de movimiento de las vibraciones que generan estas máquinas.

El control de ruidos agresivos en los centros de trabajo no se limitará al aislamiento del foco que los produce, sino que también deberán adoptarse las prevenciones técnicas necesarias para evitar que los fenómenos de reflexión y resonancia alcancen niveles peligrosos para la salud de los trabajadores.

Las máquinas-herramientas que originen trepidaciones deberán además estar provistas de horquillas u otros dispositivos amortiguadores, y al trabajador que las utilice se le proveerá de equipo de protección personal antivibratorio (cinturón, guantes, almohadillas y botas).

### **1.9. Artículo 9: Protección contra contactos en equipos eléctricos.**

En las instalaciones y equipos eléctricos, para la protección de las personas contra los contactos con partes habitualmente en tensión, se adoptarán alguna de las siguientes prevenciones:

- Se alejarán las partes activas de la instalación a distancia suficiente del lugar donde las personas habitualmente se encuentran o circulan, para evitar un contacto fortuito o por la manipulación de objetos conductores, cuando éstos puedan ser utilizados cerca de estas partes activas de la instalación.
- Se recubrirán las partes activas con el aislamiento apropiado, que permita conservar indefinidamente las propiedades del conductor y que limiten la corriente de contacto a un valor inocuo para las personas.
- Se interpondrán obstáculos que impidan todo contacto accidental con las partes activas de la instalación. Los obstáculos de protección deben estar fijados en forma segura y ser capaces de resistir los esfuerzos mecánicos usuales. Para la protección contra los riesgos de contacto con las masas de las instalaciones que puedan quedar accidentalmente con tensión, se adoptarán, en corriente alterna uno o varios de los siguientes dispositivos de seguridad:
  - Puesta a tierra de las masas. Las masas deben estar unidas eléctricamente a una toma de tierra o a un conjunto de tomas de tierra interconectadas, que tengan una resistencia apropiada. Las instalaciones, tanto con neutro aislado como con neutro unido a tierra, deben estar permanentemente controladas por un dispositivo que indique automáticamente la existencia de cualquier defecto de aislamiento, o que separe automáticamente al instalación o parte de la misma, en la que esté el defecto de la fuente de energía de la que alimenta.
  - Dispositivos de corte automático o de aviso, sensibles a la corriente de defecto (interruptores diferenciales), o a la tensión de defecto (relés de tierra).
  - Unión equipotencial o por superficie aislada de tierra o de las masas (conexiones equipotenciales).
  - Separación de los circuitos de utilización de las fuentes de energía, por medio de transformadores o grupos convertidores, manteniendo aislados de tierra todos los conductores del circuito de utilización, incluso el neutro.
  - Poner doble aislamiento de los equipos y máquinas eléctricas.

En el caso de que existan en la empresa circuitos alimentados mediante corriente continua, se adoptarán sistemas de protección adecuados para cada caso, similares a los que se acaban de mencionar para la corriente alterna.

### **1.10. Artículo 10: Electricidad estática.**

Para evitar peligros por la acumulación de electricidad estática, y especialmente aquellos que pueden venir propiciados por la producción de una chispa en ambientes inflamables, se adoptarán en general algunas o incluso ambas precauciones que a continuación se especifican:

Julio 2014

1. La humedad relativa del aire se mantendrá siempre con un valor por debajo del 50 %.
2. Las cargas de electricidad estática que puedan acumularse en los cuerpos metálicos, serán neutralizadas por medio de la conexión de conductores a tierra. La forma de realizar estas conexiones puede variar dependiendo del tipo de máquina.

### **1.11. Artículo 11: Recomendaciones sobre materias inflamables.**

Con respecto al almacenamiento y a la manipulación de las sustancias inflamables, dado su peligrosidad, estas serán todas las precauciones que se deberán cumplir para evitar cualquier accidente:

1. Se prohíbe el almacenamiento conjunto de materiales que al reaccionar entre sí puedan originar incendios.
2. Sólo podrán almacenarse materiales inflamables en los lugares y con los límites cuantitativos señalados por los reglamentos técnicos vigentes. De esta forma se almacenarán en locales distintos a los de trabajo. Si el local de trabajo es único, se deberán construir recintos aislados. En los puestos de trabajo, sólo se depositará la cantidad estrictamente necesaria para el proceso de fabricación.
3. En los almacenes de materias inflamables, los pisos deberán ser incombustibles y además impermeables, a fin de evitar la propagación del posible fuego y evitar escapes hacia sótanos, sumideros o desagües respectivamente.
4. Antes de almacenar sustancias inflamables pulverizadas, se comprobará su enfriamiento.
5. El llenado de los depósitos de líquidos inflamables, se efectuará lentamente y evitando la caída libre desde orificios de la parte superior, para evitar la mezcla de aire con los vapores explosivos. Estos recipientes de líquidos, además se rotularán indicando su contenido y las precauciones necesarias que se deberán tomar para su manipulación.
6. Antes de almacenar envases de productos inflamables, se comprobará su cierre hermético y si han sufrido algún deterioro o rotura, para evitar posibles fugas.
7. El envasado y embalaje de sustancias inflamables se efectuará, siempre que sea posible, fuera de los almacenes de donde procedan, con las precauciones y equipo de protección adecuado a cada caso.

## 1.12. Artículo 12: Prevención y extinción de incendios.

En los centros de trabajo que ofrezcan peligro de incendios, con o sin explosión, se adoptarán las prevenciones que se indican a continuación, combinando su empleo con la protección general más próxima que puedan prestar los servicios públicos contra incendios:

1. Donde existan conducciones de agua a presión, se instalarán suficientes tomas o bocas de agua a distancia conveniente entre sí y cercanas a los puestos fijos de trabajo y lugares de paso personal, colocando junto a tales tomas las correspondientes mangueras, que tendrán la sección y resistencia adecuadas para soportar la presión.
2. Cuando se carezca normalmente de agua a presión o ésta sea insuficiente, se instalarán depósitos con un volumen suficiente para poder combatir los posibles incendios.
3. En los incendios provocados por líquidos, grasas, pinturas inflamables o polvos orgánicos, solo se deberá emplear agua, y esta deberá estar además muy pulverizada.
4. No se empleará agua para extinguir fuegos en polvos de aluminio o magnesio en presencia de carburo de calcio u otras sustancias que al contacto con el agua produzcan explosiones, gases inflamables o incluso nocivos.
5. En incendios que afecten a instalaciones eléctricas con tensión, se prohibirá el empleo de extintores de espuma química, soda ácida o agua.
6. En la proximidad a los puestos de trabajo con mayor riesgo de incendio, se dispondrán, colocados en sitio visible y accesible fácilmente, extintores portátiles o móviles sobre ruedas, de espuma física o química, mezcla de ambas o polvos secos, anhídrido carbónico o agua, según convenga a la causa determinante del fuego a extinguir que sea más probable que haga su aparición.
7. Cuando se empleen distintos tipos de extintores serán rotulados con carteles indicadores del lugar o clase de incendio en el que deban emplearse. Estos extintores serán revisados periódicamente y cargados según las normas de las casas constructoras inmediatamente después de usarlos.
8. Se instruirá al personal, cuando sea necesario, del peligro que presenta el empleo de tetracloruro de carbono y cloruro de metilo en atmósferas cerradas y de las reacciones químicas peligrosas que puedan producirse en los locales de trabajo entre los líquidos extintores y las materias sobre las que puedan proyectarse.
9. En las dependencias con alto riesgo de incendio, queda terminantemente prohibido fumar o introducir cerillas, mecheros o útiles de ignición. Esta prohibición se indicará

Julio 2014

con carteles visibles a la entrada y en los espacios libres de las paredes de tales dependencias.

10. Se prohíbe igualmente al personal introducir o emplear útiles de trabajo, no autorizados por la empresa que puedan ocasionar chispas por contacto o proximidad a sustancias inflamables.
11. Es obligatorio el uso de guantes, manoplas, mandiles o trajes ignífugos, y de calzado especial contra incendios, que las empresas facilitarán a los trabajadores para uso individual.





# DOCUMENTO III: Presupuesto

## 1. Presupuesto.

En este apartado se realiza un presupuesto del proyecto teniendo en cuenta todos los componentes utilizados y gastos realizados.

En primer lugar se calcula el valor de los materiales objeto de estudio, su precio se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Coste de los materiales.

Elementos	€/Kg	Kg	Valor
Expoxy	36	0,02	0,72
Espuma	8,3	0,23	1,909
Aluminio 6mm	4,3	0,37	1,591
Aluminio 1mm	4,3	0,125	0,5375
		<b>TOTAL</b>	<b>4,7575</b>

En la siguiente tabla se muestra el precio por horas de la maquinaria empleada en el laboratorio, conociendo las horas que se han empleado se obtiene su valor:

Tabla 1.2. Coste de los elementos por hora.

Elementos	€/h	HORAS	VALOR
Horno	12	18,5	222
Adquisición datos horno	25	19	475
Soplete	45	0,5	22,5
Sierra de cinta	30	0,25	7,5
Máquina Flexión	150	1,5	225
Alumna	15	317	4755
Profesor Titular	20,3	30	609
		<b>TOTAL</b>	<b>6316</b>

A continuación se recogen los gastos fijos del proyecto, es decir, los que no dependen de las horas de uso ni de la cantidad

Tabla 1.3. Costes fijos

Elemento	€
Guantes Latex	10
Material Oficina	3
Alquiler oficina	523
Licencia Microsoft	99
<b>TOTAL</b>	<b>635</b>

Por último se ha de realizar un cálculo de los elementos empleados cuyo gasto por horas es desconocido, para ello se han de emplear las siguientes fórmulas

El coste de amortización para los bienes utilizados se calculará como sigue la siguiente forma:

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad (6.1)$$

$$t_h = \frac{a}{h} \quad (6.2)$$

, donde

a: amortización, en euros/año

VC: valor de compra, en euros

VR: valor residual al cabo del periodo de amortización, en euros

n: período de amortización, en años

$t_h$ : tasa horaria, en euros/hora

h: horas anuales trabajadas

Tabla 1.4. Costes con amortización.

	VC	Valor Residual (%)	n	a	h	Tasa horaria [€/h]	€
Guantes Horno	12	0,8	5	0,48	0,5	0,000266667	0,00013333
Ladrillos refractarios	6	0,8	5	0,24	4	0,000133333	0,00053333
Termopares	24,6	0,7	5	1,476	18,5	0,00082	0,01517
Ordenador	499	0,2	2	199,6	317	0,277222222	87,8794444
						<b>TOTAL</b>	<b>87,8952811</b>

Julio 2014

Incluyendo el Impuesto sobre el Valor Añadido y sumando todas las cantidades el presupuesto final es el siguiente:

TOTAL sin IVA	7043,65€
21% IVA	1479,17€
<b>TOTAL</b>	<b>8522,82€</b>



## 10. Anexo 1: Análisis estadístico de accidentes apartado 3.4.

En este anexo se explica el procedimiento y clasificación utilizados para realizar el estudio estadístico de los accidentes aéreos nombrados en el apartado 3.4.

Tabla 0-1: Clasificación accidentes

Nºaccidente	Fecha	Lugar	Tipo de avión
1	08/08/1943	Homestead EEUU	Curtis-46D-10-CU
2	18/02/1944	Scramento EEUU	Curtis-46D-10-CU
3	26/01/1945	Buffalo EEUU	Curtis-46D-35-CU
4	07/06/1945	Savannah EEUU	Douglas DC3
5	11/07/1946	Spaatz Field EEUU	Lockheed L-049
6	24/10/1947	LA, EEUU	Douglas DC-6
7	27/01/1951	Paris, Francia	Savoia-Marchetti
8	02/08/1960	Sao Paulo, Brasil	Curtis-46D-10-CU
9	17/08/1960	Cairo, Egipto	Ilyushin 18B
10	22/01/1961	Moscú, Rusia	Ilyushin18B
11	22/09/1966	Mount Isa, Australia	Vickers 832
12	14/01/1967	Novosibirsk, Rusia	Antonov 12B
13	23/06/1967	Elmira, EEUU	BAC one-Eleven 204AF
14	11/09/1968	Ajaccio, Francia	SE-210 Caravelle III
15	26/06/1969	Magadan, Rusia	Ilyushin 14M
16	09/05/1970	Mogadishu, Somalia	Vickers 785D
17	14/08/1972	Berlin, Alemania	Ilyushin 62
18	31/08/1972	Alma, Kazajistán	Ilyushin 18V
19	11/07/1973	Rio de Janeiro, Brasil	Boeing 707
20	26/11/1973	Boston EEUU	Boeing 707
21	27/09/1974	Altus, EEUU	Lockheed C %A
22	26/11/1979	Arabia Saudí	Boeing 707
23	19/08/1980	Arabia Saudí	Lockheed L-1011
24	02/06/1983	Dallas, EEUU	McDonell Douglas DC-9-32
25	28/11/1987	Mauritania	Boeing 747
26	27/09/1988	Rusia	Antonov 8
27	17/11/1990	Basel, Francia	Tupolev 154M
28	11/07/1991	Arabia Saudí	MacDonell Douglas DC-8-61
29	08/07/1993	Rusia	Ilyushin 76M
30	03/01/1994	Irkitsk, Rusia	Tupolev 154M
31	14/12/1994	Fresno, EEUU	Learjet 35A
32	19/12/1994	Arabia Saudí	Boeing 707
33	16/05/1995	Gran Bretaña	Nimrod R1P
34	18/06/1998	Montreal, Canada	SA226-TC
35	02/09/1998	Nuevo York, EEUU	MacDonell Douglas MD-11
36	08/08/2000	Greensboro, EEUU	McDonell Douglas DC-9-32
37	21/09/2000	Valencia, España	Boeing 707
38	29/11/2000	Atlanta, EEUU	McDonell Douglas DC-9-32
39	02/12/2011	Rusia	Ilyushin 76TD
40	13/05/2002	Toronto, Canada	Boeing 767
41	27/04/2004	Uruguay	Fokker F-27
42	02/09/2006	Afganistán	Nimrod MR2

Julio 2014

43	03/09/2010	Emiratos Árabes	Boeing 747
----	------------	-----------------	------------

Tabla 0-2. Clasificación accidentes.

Nº accidente	Tipo de fuego	Localización	Tiempo NS	Tripulantes	% Supervivientes
1	Motor			5	20
2	Oculto			5	60
3	Oculto			5	40
4	Oculto	cargo		22	0
5	Oculto			6	16,67
6	Oculto	tanques	8	52	0
7	Oculto	rayo		17	17,64705882
8	Cabina			5	86,11111111
9	Motor			34	0
10	Motor			97	100
11	Oculto	tanques	7	24	0
12	Oculto	alas		6	0
13	Motor			34	0
14	Cabina		4	95	0
15	Cabina			5	40
16	Oculto			30	83,33333333
17	Oculto		29	156	0
18	Cabina			101	0
19	Cabina			134	6,71641791
20	Oculto		35	3	0
21	Oculto (Fuselaje)	Fuselaje		5	100
22	Cabina		16	156	0
23	Oculto (carga)	Carga	33	301	0
24	Oculto			46	50
25	Oculto		19		0
26	Motor			5	0
27	Cabina			6	100
28	Oculto		10	261	100
29	Cabina			11	0
30	Motor			124	0
31	Oculto			2	0
32	Oculto (carga)	Carga		5	40
33	Motor			7	100
34	Oculto (rueda)	Rueda	14	11	0
35	Cabina		15	229	0
36	Oculto			63	100
37	Cabina			10	100
38	Oculto	Fuga lavabo		97	100
39	Cabina			18	0
40	Oculto	Carga		185	100
41	Oculto	Carga		3	100
42	Oculto	Tanques	16	14	0
43	Oculto	Carga	29	2	0

En la tabla 9-1 se presentan todos los accidentes analizados clasificados cronológicamente. Cabe mencionar que se ha añadido una columna para numerar los accidentes (primera columna) con el único objeto de facilitar la lectura. La tabla 9-2 es una tabla técnica en que se clasifican los tipos de fuego y el índice de supervivencia. Un parámetro fundamental para el estudio realizado es el “Tiempo NS” (cuarta columna de la tabla 9-2). Este parámetro es el Tiempo de No Supervivencia, definido como el tiempo que transcurre desde que se detecta un incendio hasta que la posibilidad de sobrevivir es nula.

Este es el parámetro mediante el cual se ha obtenido la gráfica que representa la probabilidad de supervivencia en función del tiempo, ya explicada en el apartado 3.4.



Para ello es necesario aplicar la distribución de Weibull, un modelo continuo asociado a variables del tipo tiempo de vida, tiempo hasta que un mecanismo falla, etc.

### 10. 1.Anexo 1: Resolución de la distribución de Weibull.

Para obtener la distribución es necesario seguir los siguientes pasos. En primer lugar se han de ordenar los tiempo de No supervivencia de menor a mayor, y se ha de calcular la función de probabilidad ed fallo  $F(t)$  . Al ser el número de datos (  $n=13$ ) menor de 20 la expresión adecuada para obtener la función de la probabilidad de fallo es la siguiente:

$$F(t) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (10.1.1)$$

Julio 2014

Donde n representa el número de datos e i va desde 1 hasta n.

Aplicando la fórmula estos son los datos obtenidos:

Tabla 0-3. Datos para la distribución de Weibull.

i	Tiempo NS	F(t)
1	4	5,22
2	7	12,69
3	8	20,15
4	10	27,61
5	14	35,07
6	15	42,54
7	16	50,00
8	16	57,46
9	19	64,93
10	29	72,39
11	29	79,85
12	33	87,31
13	35	94,78

La distribución de Weibull tiene la siguiente forma:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (10.1.2)$$

Donde

$\beta$  = Parámetro de forma

$\gamma$  = parámetro de traslación

$\eta$  = parámetro de tiempo

El siguiente paso es representar los datos en el papel ajuste de distribución de forma. Como vemos en la figura 9-1 se obtiene una recta. Esto quiere decir que el parámetro gamma es nulo. De la recta se obtienen los parámetros de tiempo y forma dando lugar al siguiente resultado:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{22}\right)^{1.9}} \quad (10.1.3)$$

A continuación se adjunta el papel empleado para la resolución de la función de Weibull, en rojo están representados los puntos obtenidos mediante la función de probabilidad de fallo, a en este caso los puntos pueden aproximarse a una recta. De ser de otro modo sería necesario realizar un ajuste de parámetros para transformar los datos. De esta recta se obtiene el



Julio 2014

parámetro de tiempo con el corte en el eje horizontal, y trasladándola en paralelo hasta el punto "O" se obtiene el parámetro de forma con el corte en el eje vertical.

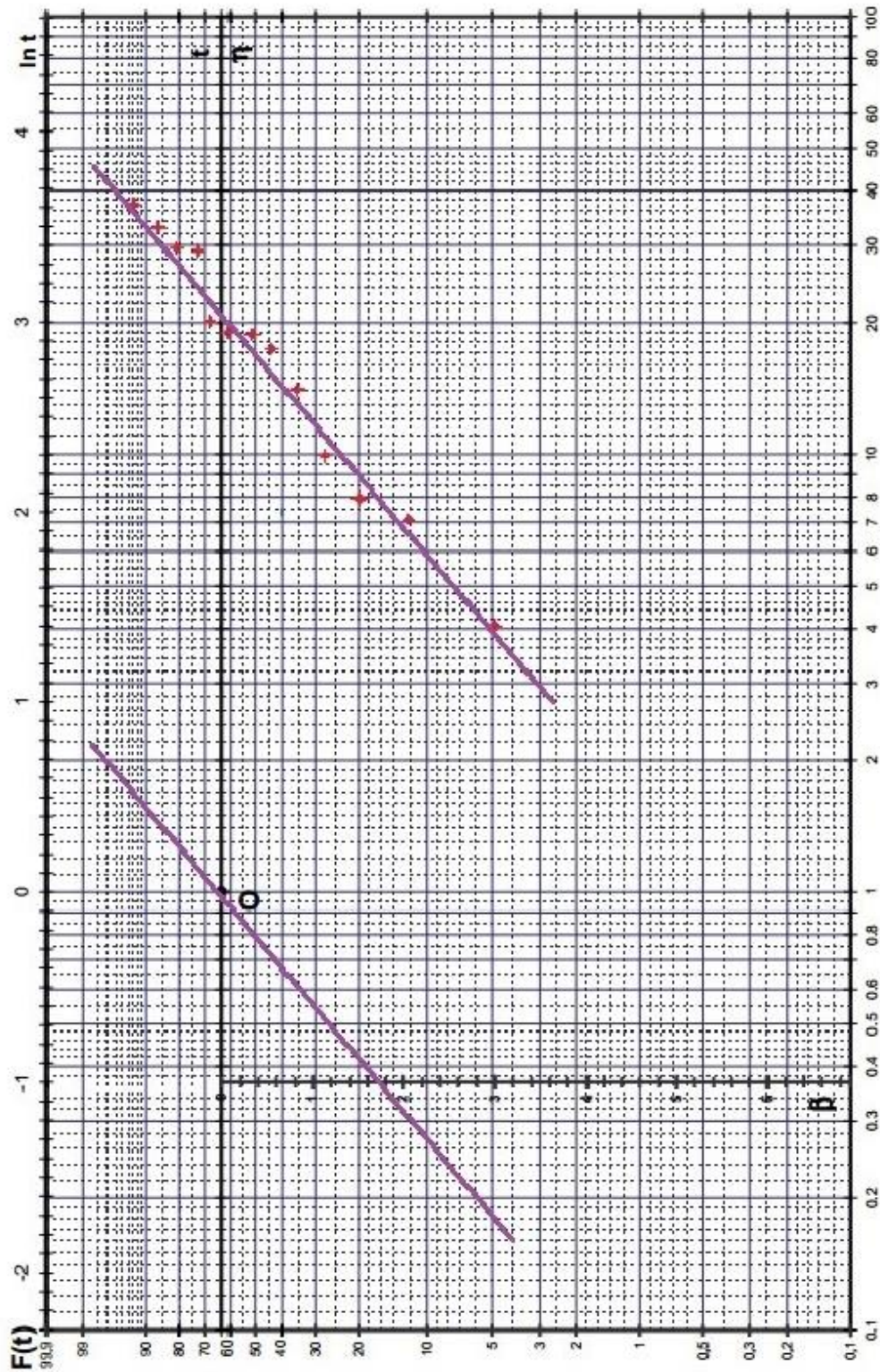


Ilustración 0-1. Papel de Weibull utilizado para la resolución del problema.

