

P.J. Astola^a, M.A. Rodríguez^a, F.J. Botana^b, L. González-Rovira^b^a TITANIA, Ensayos y Proyectos Industriales S.L.

P.T. Tecnobahía, ed. RETSE nave 4, 11500, El Puerto de Santa María, España.

^b Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, Grupo de Corrosión (Labcyp), Universidad de Cádiz, Avenida de la Universidad de Cádiz s/n, 11519 Puerto Real (Cádiz), España.

Caracterización de elementos de protección térmica de materiales compuestos mediante análisis térmicos

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Automoción

Protección térmica

Caracterización

Materiales compuestos

La competición automovilística de más alto nivel es uno de los sectores que lleva a los materiales al límite de sus especificaciones en su puesta en servicio, creando de esta forma conocimiento en nuevos campos tecnológicos. Un ejemplo es el empleo de estructuras realizadas en CFRPs en la competición, que empieza a trasladarse paulatinamente a la industria automovilística general.

El objetivo de este trabajo es determinar la eficacia de elementos de protección térmica que deben instalarse en aquellas estructuras de los vehículos fabricadas en CFRP expuestas a elevadas temperaturas, como por ejemplo los pontones que cubren la unidad de potencia y sus colectores de escape, tratando de discriminar cuales de ellas ofrecen una mejor protección al menor peso posible.

En este trabajo, se han evaluado 3 sistemas de protección distintos, sometiendo cada uno a 3 tipologías de ensayo, tales como, adherencia, peso y eficacia de protección térmica.

El método aquí descrito, ha posibilitado evaluar la distinta eficacia de los sistemas ensayados, arrojando datos adicionales sobre peso, adherencia y coste del sistema de protección.

Characterization of thermal protection elements for composites materials through thermal analysis

ABSTRACT

Keywords:

Automotive

Thermal protection

Characterization

Composites materials

Highest level automotive competition is one of the sectors that takes the materials to the limit of their specifications in their commissioning, creating in this way knowledge in new technological fields. An example would be the use of structures made in CFRPs in competition, being gradually moving on the general automotive industry.

The objective of this work is to determine the effectiveness of thermal protection elements that have to be installed in those structures of vehicles manufactured in CFRP exposed to high temperatures, such as pontoons covering the power unit and its exhaust manifolds, treating to discriminate which of them offer better protection at the lowest possible weight.

In this work, 3 different protection systems have been evaluated, subjecting them to 3 types of tests, such as adhesion, weight and effectiveness of thermal protection.

The method described here has made possible to evaluate the different efficacy of the systems tested, yielding additional data on the weight, adhesion and cost of the protection system.

1 Introducción

El mundo de la competición automovilística de alto nivel es una fuente continuada de desarrollos innovadores, los cuales en muchos casos terminan repercutiendo en los vehículos de fabricación seriada que circulan por nuestras carreteras. Concretamente, las categorías inferiores de las competiciones de vehículos monoplazas, tales como F2 (GP2 Series) y F3 (GP3 Series), se caracterizan por emplear el mismo motor y chasis en cada categoría para todos los equipos, siendo en estos casos los pilotos los que principalmente marcan las diferencias en los resultados obtenidos.

Dentro de este estricto reglamento de competición, quedan resquicios para que los ingenieros de los equipos traten de optimizar el rendimiento de los vehículos, siempre y cuando no se alteren los componentes básicos de los monoplazas, principalmente la reducción de peso del conjunto, respetando el mínimo establecido por la FIA para cada categoría. Es este el origen de la alta competitividad que existe entre los equipos, ya que pequeños cambios pueden representar grandes diferencias con respecto a los demás competidores.

En este contexto, TITANIA ha puesto a punto un plan de ensayos orientado a la caracterización de los sistemas de protección térmica de estructuras fabricadas en CFRP para los vehículos de GP2 y GP3 series, empleados principalmente en los pontones y zonas aladañas de la unidad de potencia. El objetivo de dicho plan consistía en encontrar un protector térmico más eficaz que el usado hasta el momento y que aportase una reducción de peso del conjunto.

1.1 Definición de requisitos

Los vehículos de GP2 series montan unidades de potencia de 2000 c.c. y generan 580 C.V. de potencia. Los GP3 series montan unidades de potencia de 1600 c.c. y generan 200 C.V. En ambos casos, los motores superan con facilidad las 10.000 R.P.M.s, generando gran cantidad de calor que es evacuada principalmente por los sistemas de escape, los cuales llegan a alcanzar temperaturas de servicio de hasta **900°C**. Empleando el flujo de aire adecuado en el habitáculo del motor, se logra que la temperatura media durante carrera se establezca en esta zona entorno a los 180-200 °C, temperatura excesiva para la exposición prolongada de la resina del elemento de fibra de carbono de los pontones. Es por ello que se emplean sistemas de protección térmica en dichas zonas, principalmente escudos deflectores fabricados en aluminio, que aportan un peso total de aproximadamente 480 g. para una superficie de aproximadamente 0,54 m². El objetivo de reducción de **peso** para el nuevo sistema de protección se estableció en el **50%** del actual, es decir, en torno a 250 g.

Así mismo, el plan de ensayo debe contemplar pruebas para verificar la **adherencia** de los sistemas estudiados a las estructuras CFRP, ya que un fallo en carrera podría comprometer la integridad del vehículo y la seguridad del piloto.

Finalmente, este plan de ensayo debe aportar información sobre la eficacia de la **protección térmica** ofrecida por cada sistema estudiado, ya que el actualmente empleado presenta problemas en este sentido, alcanzando temperaturas superiores a los 120 °C en el exterior de las zonas protegidas,

lo cual deteriora la pintura de los monoplazas en dichas zonas. Por tanto, sería deseable encontrar un material de protección que fuese capaz de mantener la temperatura exterior de las zonas protegidas entorno a los **100 °C**.

2 Desarrollo Experimental

Dada la definición de requisitos que el plan de ensayos a desarrollar debe ser capaz de evaluar, se definen a continuación las categorías de ensayos contemplados en dicho plan.

2.1 Gravimetría

Con objeto de realizar estimaciones sobre el peso final que tendrían los sistemas de protección estudiados para la superficie a proteger, se realizará el cálculo de densidad superficial de cada material a través de gravimetría. Se ha empleado para ello una balanza semi-micro, evaluando muestras de aproximadamente 5x5 cm. de superficie, para así hallar la densidad superficial de cada material en Kg/m², con la que se ha calculado el peso esperado del escudo, siguiendo para ello las siguientes ecuaciones.

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{peso experimental} \left[\frac{g}{\text{cm}^2} \right]}{\text{superficie experimental} \left[\text{cm}^2 \right]} \quad (1)$$

$$\text{Peso escudo (Kg)} = \rho \left[\frac{g}{\text{cm}^2} \right] \times \text{superficie escudo} [\text{cm}^2] \quad (2)$$

$$\text{Reduccion de peso (\%)} = \frac{\text{peso}_{\text{material}} - 480 \text{ g}}{480 \text{ g}} \times 100 \quad (3)$$



Figura 1. Balanza de gravimetría

Los ensayos se realizaron empleando una balanza Mettler Toledo, modelo MS105DU, con precisión de 0,01 mg.

2.2 Adherencia

Para evaluar la adherencia de los sistemas de protección térmica estudiados se han empleado dos tipologías distintas de ensayo, cada una adecuada a la naturaleza del material empleado en la fabricación del sistema.

Para los sistemas basados en recubrimientos orgánicos (pinturas anticorrosivas), se ha empleado para la evaluación de la adherencia los siguientes ensayos:



- ✓ Adherencia en seco (UNE-EN ISO 2409) [1]
- ✓ Adherencia en húmedo (UNE-EN ISO 2409) [1]
- ✓ Pull-off (UNE- EN ISO 4624) [2]

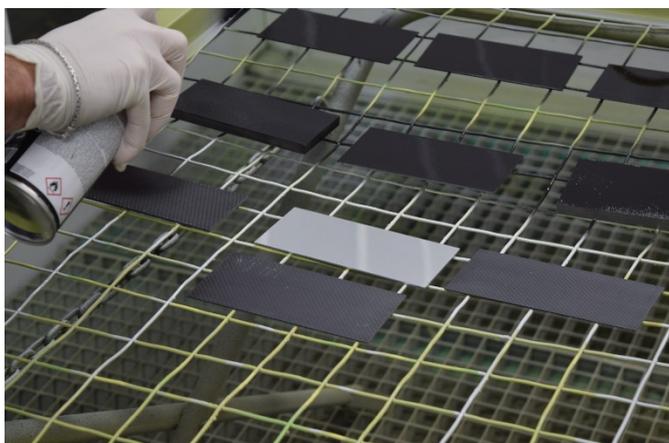


Figura 2. Pinturas anticorrosivas aplicadas a las muestras a ensayar

Los ensayos de adherencia en seco referenciados consisten principalmente en la realización de un corte enrejado sobre el recubrimiento, sobre el que posteriormente se coloca una cinta adhesiva normalizada. La adherencia de la pintura ensayada se evalúa por el estado en que queda la zona reticulada tras la retirada de la cinta, entre grado 0 (adherencia óptima), y 5 (adherencia deficiente). En la figura 3 se describen los resultados descriptivos y numéricos de este ensayo, a través de un extracto de la norma de aplicación.

Tabla 1 – Clasificación de los resultados del ensayo

| Categoría | Descripción | Aspecto de la superficie de la zona cuadrículada con presencia de descamación ^a (Ejemplo para seis incisiones paralelas) |
|-----------|---|--|
| 0 | Los bordes de las incisiones son perfectamente lisos: ningún cuadrado del enrejado se ha desprendido | |
| 1 | Se observan ligeros desprendimientos del recubrimiento en las intersecciones de las incisiones. El área de enrejado afectada no es superior al 5% | |
| 2 | Se observan desprendimientos del recubrimiento en los bordes y/o en las intersecciones de las incisiones. El área de enrejado afectada es mayor del 5% pero no mayor del 15% | |
| 3 | El recubrimiento se ha desprendido parcial o totalmente en grandes bandas a lo largo de los bordes de las incisiones y/o se ha desprendido parcial o totalmente en distintas partes de los cuadrados. El área de enrejado afectada es mayor del 15% pero no mayor del 35% | |
| 4 | El recubrimiento se ha desprendido en grandes bandas a lo largo de los bordes de las incisiones y/o algunos cuadrados se han desprendido parcial o totalmente. El área de enrejado afectada es mayor del 35% pero no mayor del 65% | |
| 5 | Se observa un grado de desprendimiento superior al de la categoría 4 | - |

^a Las figuras son ejemplos para un enrejado dentro de cada categoría. Los porcentajes reflejados se basan en la impresión visual que muestran las imágenes y los mismos porcentajes no serían reproducibles necesariamente mediante imágenes digitales.

Figura 3. Clasificación de resultado ensayos de Adherencia

Los ensayos de adherencia en húmedo son similares, solo que las muestras son sometidas a inmersión en agua durante un periodo de tiempo antes de realizar el ensayo de adherencia tal como ha sido descrito en el apartado anterior.

Los ensayos de adherencia fueron realizados empleando un probador de adherencia multi-cuchillas marca BYK, modelo 3430.

Adicionalmente, se realizaron ensayos de tipo pull-off, en los que se somete a los recubrimientos a una fuerza normal a la superficie, mediante la instalación de una sufridera de la que

se realiza una tracción mecánica. En este caso, se empleó un equipo de adherencia digital, de la marca Neurtek, modelo AT-1, similar al que aparece en la figura 4.



Figura 4. Equipo para ensayo Pull-off

Por su parte, para los sistemas basados en escudos deflectores (lámina de interposición), se ha empleado para la evaluación de la adherencia el siguiente ensayo:

- ✓ Ensayo de pelado a tracción ASTM-D3330 [3] (método A, a 180°)

Este ensayo evalúa la adherencia mediante pelado mecánico a 180° del recubrimiento, registrando la fuerza necesaria para despegar el escudo de una probeta normaliza, tal como se ilustra en la figura 5.



Figura 5. Ensayo de pelado a tracción a 180°

Para la realización de estos ensayos se empleó una máquina universal de ensayos marca Shimadzu, modelo AG-IS, dotada de una célula de carga de 1 KN y clase 0,5.



2.3 Eficacia de protección térmica

Ante la ausencia de un método normalizado para evaluar el grado de protección térmica que ofrecen los sistemas bajo estudio, se ha desarrollado un método en el laboratorio para simular las condiciones de servicio en el rango de temperaturas requerido. Para ello se ha empleado un horno Mufla (marca Herotec, modelo HD-150) como fuente de calor radiante, colocando las probetas de ensayo en la zona de la tapa del horno, con la cara protegida expuesta al interior caliente del horno, y la otra cara no protegida expuesta a las condiciones normales del laboratorio.

Adicionalmente, se ha empleado un registrador de datos marca Agilent, modelo 34970^a, conectado a dos sensores de temperatura (termopares tipo K), uno colocado justo delante de la cara expuesta al horno, y el otro en la cara exterior. De esta forma, se reguló la potencia del horno hasta lograr estabilizar la temperatura del termopar interior en las condiciones de servicio a simular, es decir, entre 180 y 200°C durante al menos 30 minutos. Pasado este tiempo, se configuró el horno para alcanzar su máxima temperatura (unos 1.200°C), para provocar, de esta forma, el fallo del sistema de protección térmica, señalado por la presencia de humo o llamas en la muestra objeto de estudio. La figura 6 muestra el dispositivo de ensayos desarrollado.

Así pues, el grado de desempeño de cada sistema estudiado es evaluado mediante la temperatura registrada por el sensor exterior, tanto en la fase estacionaria, como en la fase de fallo forzado.

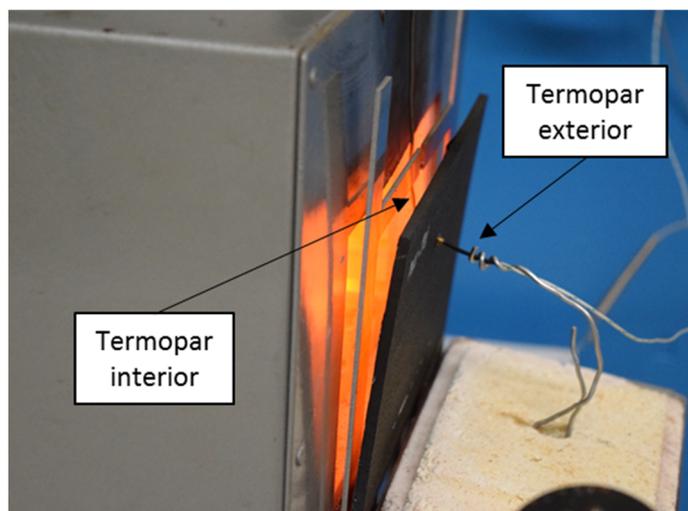


Figura 6. Dispositivo de ensayo para la evaluación de la protección térmica, dotado de termopar interior y exterior

El método emplea probetas de CFRP de 250 x 120 mm. y 4 mm. de espesor, simulando así el material empleado en la fabricación de los pontones a proteger.

3 Sistemas de Protección Ensayados

Una vez definido el plan de ensayos, se procede a describir los sistemas de protección térmica que fueron sometidos a ensayo. Concretamente se ensayaron un total de 6 sistemas, agrupados de 3 tipologías distintas.

3.1 Pinturas Anticalóricas

Son un tipo de esmalte, muy empleado en la industria del motor, fabricado con resinas de silicona modificada para resistir temperaturas en torno a los 400-500 °C, llegando algunos a resistir hasta 800°C.

Su adherencia y comportamiento térmico sobre base metálica están sobradamente demostrados, empleándose habitualmente como recubrimiento de bloques de motor y colectores de escape. No obstante, no se han encontrado datos bibliográficos que soporten el rendimiento de estos recubrimientos ni su adherencia sobre base plástica, tal como las estructuras fabricadas en CFRP que se pretenden proteger.

A este respecto, se decide emplear un sistema de pintura anticalórica resistente hasta 800°C, junto con su propio promotor de adherencia (material I). Adicionalmente, se ensayará esta misma pintura anticalórica pero empleando un promotor de adherencia procedente del sector aeroespacial, cuya compatibilidad con los CFRPs está garantizada (material II).

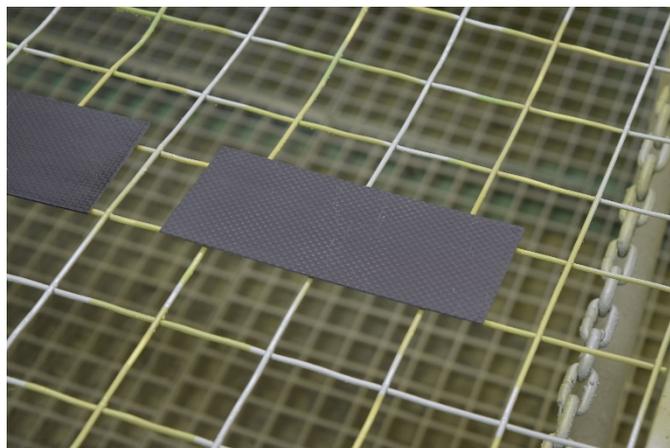


Figura 7. Probetas protegidas mediante pinturas anticalóricas.

3.2 Escudos Deflectores

En esta categoría se han ensayado dos materiales distintos:

- ✓ Cinta térmica adhesiva, es un recubrimiento de color dorado que trabaja a unas temperaturas de entre 400-500 °C. Su mejor característica es la baja densidad y una adherencia "razonable" (material III). La figura 8 muestra una probeta protegida por dicho escudo.



Figura 8. Cinta térmica adhesiva



- ✓ Escudo térmico cerámico, es un recubrimiento en base aluminio en el que se ha dispersado una matriz cerámica, la que le confiere una gran capacidad de dispersión y resistencia térmica.

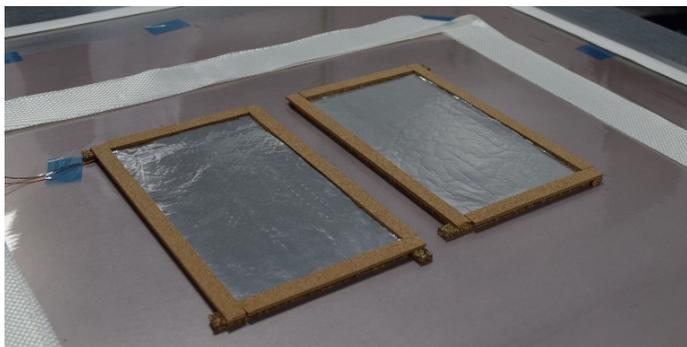


Figura 9. Escudos térmicos cerámicos

Disponible en dos formatos, uno con su propio adhesivo de origen 3M (material IV), y otro sin adhesivo. Se decide comparar ambos sistemas, usando un adhesivo de origen aeroespacial (material V) para adherir el escudo sin adhesivo a las probetas de CFRP a ensayar.

3.3 Escudos Ablativos

Los Escudos Ablativos son una modificación de aglomerados de corcho convencional ampliamente utilizado en el sector espacial por sus asombrosas capacidades, su baja densidad (0,48 Kg/m²) y su alta resistencia térmica (2700 °C), características que lo hacen susceptible de ser sometido al plan de ensayos definido (material VI).



Figura 10. Escudo Ablativo

4 Resultados y Discusión

Pasamos a presentar los resultados obtenidos por los ensayos objeto del plan en cada uno de los distintos materiales de protección térmica estudiados.

4.1 Resultados ensayos Gravimetría

A continuación se presentan los resultados de las gravimetrías realizadas, especificando su densidad superficial, el peso teórico del escudo calculado y el porcentaje de reducción obtenido con respecto al requerimiento de disminución de peso del escudo inicial, establecido en 480 g.

4.1.1 Pintura anticorrosiva

En este caso, ambos sistemas, el que emplea el promotor de adherencia del fabricante y que emplea el promotor de adherencia aeroespacial, arrojan resultados muy similares en lo que a reducción de peso se refiere.

Tabla 1. Peso pinturas anticorrosivas

| PINTURAS ANTICORROSIVAS | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Densidad superficial calculada (Kg/m ²) | Peso teórico del escudo (g) | Porcentaje de reducción de peso (%) |
| 0,0479 Kg/m ² | 25,9 g | -94% |

4.1.2 Escudos deflectores

Se presentan a continuación los resultados obtenidos por la *Cinta Térmica Adhesiva dorada*.

Tabla 2. Gravimetría cinta adhesiva dorada

| CINTA TERMICA ADHESIVA DORADA | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Densidad superficial calculada (Kg/m ²) | Peso teórico del escudo (g) | Porcentaje de reducción de peso (%) |
| 0,1693 Kg/m ² | 91,42 g | -81% |

En lo que a los *Escudos Térmicos Cerámicos*, estos fueron los resultados obtenidos.

Tabla 3. Gravimetría escudo térmico cerámico

| ESCUDOS TERMICOS CERÁMICOS | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Densidad superficial calculada (Kg/m ²) | Peso teórico del escudo (g) | Porcentaje de reducción de peso (%) |
| 0,464 Kg/m ² | 250,5 g | -48% |

En este caso, ambos sistemas, tanto el adhesivo 3M original como el adhesivo de origen aeroespacial, ofrecen resultados de gravimetría muy similares.

4.1.3 Escudo Ablativo

Se presentan a continuación los resultados obtenidos por el *Escudo Térmico Ablativo*.

Tabla 4. Gravimetría material ablativo

| ESCUDO TERMICO ABLATIVO | | |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Densidad superficial calculada (Kg/m ²) | Peso teórico del escudo (g) | Porcentaje de reducción de peso (%) |
| 1,35 Kg/m ² | 730 g | +52% |

En este caso, el escudo ablativo, lejos de aportar reducción de peso, incrementa éste notablemente.

4.1.4 Conclusiones ensayos de gravimetría

A la vista de los resultados obtenidos, los sistemas basados en recubrimientos orgánicos (pinturas anticorrosivas), presentan



un importante porcentaje de reducción de peso. No obstante, el resto de sistemas de protección basados en escudos deflectores cumplen también con el porcentaje objetivo de reducción de peso, entorno al 50%.

Por el contrario, el escudo ablativo estudiado no cumple con dicho objetivo de reducción, aportando un incremento de peso notable.

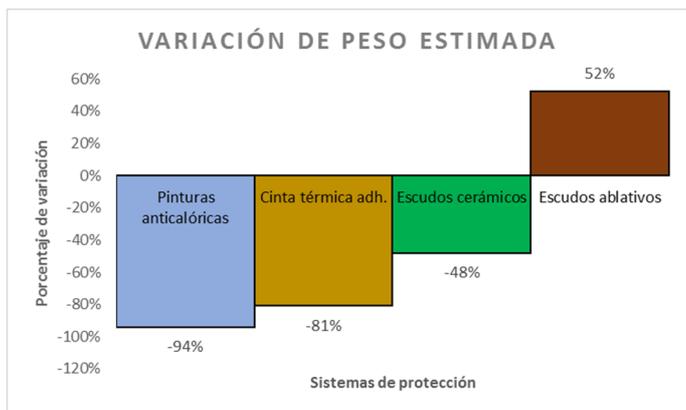


Figura 11. Resumen de resultados ensayos gravimétricos

4.2 Resultados ensayos de Adherencia

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los distintos ensayos de adherencia realizado a cada uno de los sistemas de protección térmica ensayados.

4.2.1 Escudos deflectores

La adherencia de los sistemas tipo escudos fue caracterizada mediante la evaluación de la fuerza de pelado a tracción de probetas mecanizadas y ensayadas conforme a la norma ASTM-D3330 [3], determinando el valor promedio de 3 probetas individuales.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos.

Tabla 5. Fuerza de pelado cinta térmica adhesiva dorada

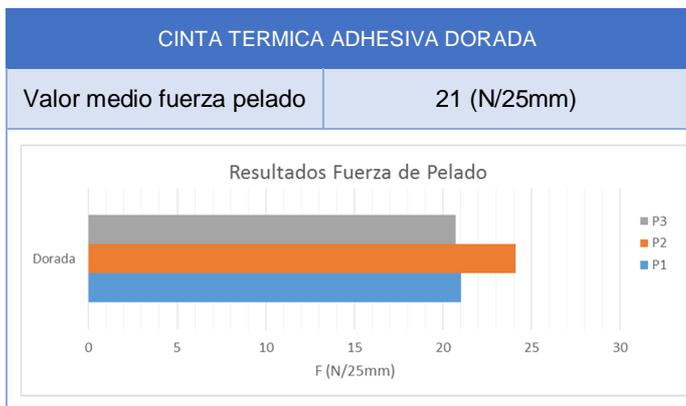


Tabla 6. Fuerza de pelado escudos térmicos cerámicos

| ESCUDOS TERMICOS CERÁMICOS | |
|----------------------------|-------------|
| Valor medio fuerza pelado | 40 (N/25mm) |

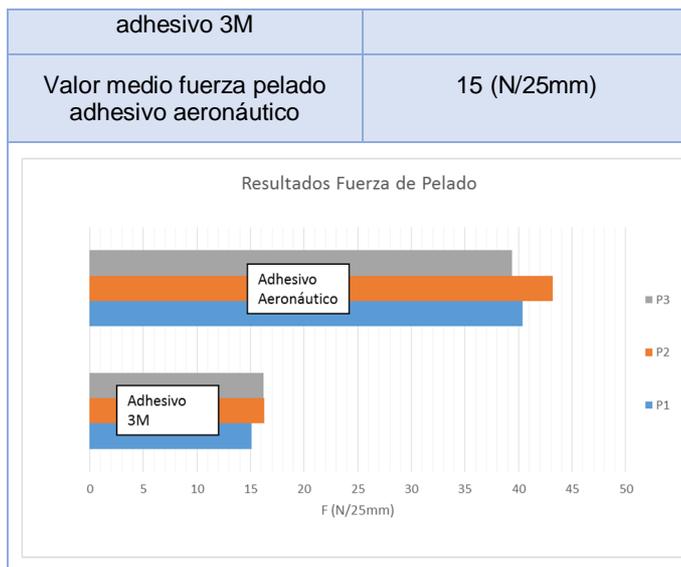


Tabla 7. Fuerza de pelado escudo térmico ablativo

| ESCUDO TERMICO ABLATIVO | |
|---|---------------|
| Valor medio fuerza pelado | N.D. (N/25mm) |
| Las características mecánicas de este material impiden la realización de este ensayo. | |

4.2.2 Pinturas anticorrosivas

La adherencia de los sistemas tipo recubrimientos orgánicos fue caracterizada mediante la evaluación de la adherencia en seco y en húmedo por corte enrejado (UNE-EN ISO 2409) [1], así como la resistencia a la tracción mediante el ensayo Pull-Off (UNE-EN ISO 4624) [2]. Para todos estos ensayos se prepararon probetas conforme a sus correspondientes normas, determinando el valor promedio de 3 probetas individuales para cada resultado.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para cada producto ensayado, considerando el sistema de pintura anticorrosiva con su propio promotor y con promotor de origen aeroespacial.

Tabla 8. Ensayo adherencia pintura anticorrosiva con promotor propio

| PINTURA ANTICORROSIVA PROMOTOR ADHERENCIA PROPIO | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Adherencia en seco | Adherencia en húmedo | Pull-Off (kg/cm ²) |
| 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | N.D.* |
| *Las sufrideras para el ensayo Pull-Off se despegaron antes de comenzar el propio ensayo. | | |



Tabla 9. Ensayo adherencia pintura anticorrosiva con promotor aeroespacial

| PINTURA ANTICORROSIVA PROMOTOR ADHERENCIA AEROESPACIAL | | |
|--|----------------------|--------------------------------|
| Adherencia en seco | Adherencia en húmedo | Pull-Off (kg/cm ²) |
| 0 / 0 / 0 | 0 / 0 / 0 | N.D.* |

*Las sufrideras para el ensayo Pull-Off se despegaron antes de comenzar el propio ensayo.

Adicionalmente, se prepararon probetas de referencia metálicas y de CFRP sin aplicación de promotor de adherencia, realizando los mismos ensayos para obtener una referencia sobre las características esperables para estos sistemas de protección. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 10. Ensayo adherencia pintura anticorrosiva sustrato metálico

| PINTURA ANTICORROSIVA SOBRE SUSTRATO METÁLICO | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Adherencia en seco | Adherencia en húmedo | Pull-Off (kg/cm ²) |
| 0 / 0 / 0 | 5 / 5 / 5 * | 80 / 93,7 |

*Este resultado indica una pésima adherencia de la pintura anticorrosiva sobre el sustrato metálico cuando éste ha sido sumergido en agua.

Tabla 10. Ensayo adherencia pintura anticorrosiva sustrato CFRP

| PINTURA ANTICORROSIVA SOBRE SUSTRATO CFRP | | |
|---|----------------------|--------------------------------|
| Adherencia en seco | Adherencia en húmedo | Pull-Off (kg/cm ²) |
| 0 / 0 / 0 | 1 / 2 / 1 | 2 / N.D.* |

*La resistencia a la tracción de esta pintura sobre el sustrato CFRP es mínima.

4.2.3 Conclusiones ensayos adherencia

Los resultados indican que el uso de pintura anticorrosiva requiere de la aplicación de un promotor de adherencia, ya sea el propio de la pintura o el de origen aeroespacial. Por otra parte, los bajos resultados del ensayo Pull-Off hacen pensar en una posible sensibilidad de los recubrimientos a las vibraciones, suposición que no puede ser verificada en el laboratorio.

4.3 Resultados ensayos de Eficacia de protección térmica

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para ensayos de evaluación de la eficacia de la protección térmica que confieren los distintos sistemas estudiados.

En las siguientes gráficas, la línea de color celeste fijada a 120°C representa la referencia del sistema de protección térmica empleado hasta el momento, mientras que la curva en color negro representa la temperatura registrada por una probeta de CFRP que ha sido expuesta a la misma rampa de temperaturas sin ningún tipo de sistema de protección térmica.

4.3.1 Pinturas anticorrosivas

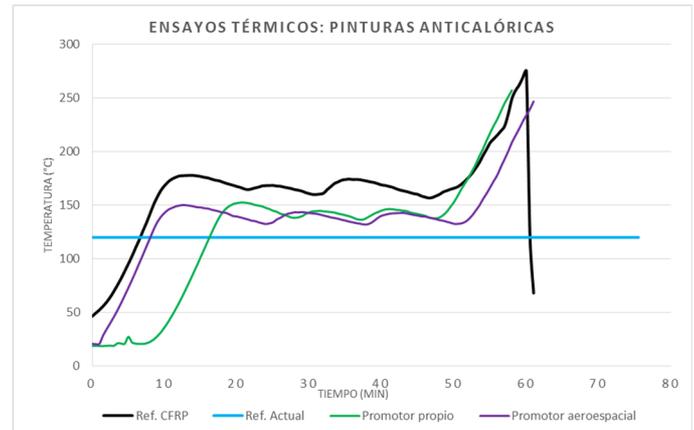


Figura 12. Ensayo térmico sobre pinturas anticorrosivas

4.3.2 Escudos deflectores

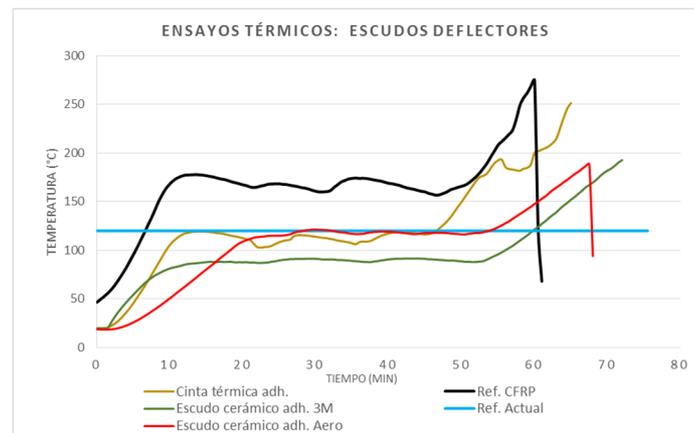


Figura 13. Ensayo térmico sobre escudos deflectores

4.3.3 Escudo Ablativo

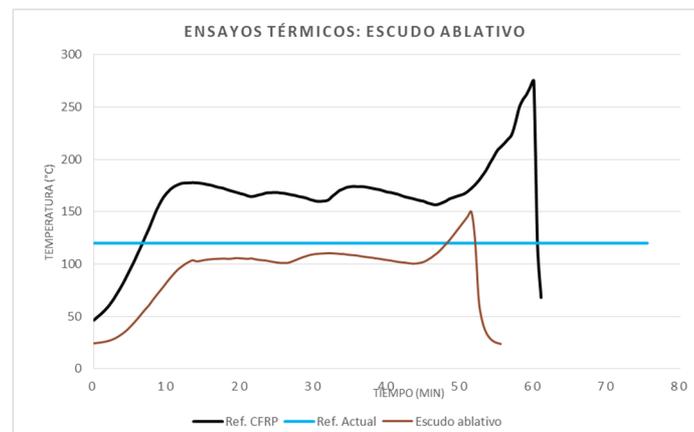


Figura 14. Ensayo térmico sobre escudo ablativo



|  | Factor de ponderación importancia | ESCUDOS DEFLECTORES | | | | | | ESCUDO ABLATIVO | | PINTURAS ANTICALÓRICAS | | | |
|--|-----------------------------------|---------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------|------------------------|-----------|---------------|-----------|
| | | Cerámico adh. 3M | | Cerámico adh. Aero | | Cinta térmica adh. | | Corcho ablativo | | Promotor propio | | Promotor aero | |
| | | Puntuación | Ponderada | Puntuación | Ponderada | Puntuación | Ponderada | Puntuación | Ponderada | Puntuación | Ponderada | Puntuación | Ponderada |
| Eficacia térmica | 3 | 6 | 18 | 3 | 9 | 4 | 12 | 5 | 15 | 1 | 3 | 2 | 6 |
| Peso | 2 | 3 | 6 | 2 | 4 | 4 | 8 | 1 | 2 | 6 | 12 | 5 | 10 |
| Adherencia | 1 | 6 | 6 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| TOTALES PONDERADOS | | 30 | | 17 | | 25 | | 20 | | 16 | | 18 | |

Figura 14. Ponderación de los resultados globales del plan de ensayos

4.3.4 Conclusiones ensayos térmicos

A la vista de los resultados obtenidos, los sistemas basados en pinturas anticalóricas no ofrecen un grado de protección térmica superior al actualmente empleado. Por el contrario, los escudos deflectores y ablativo si logran en igualar o incluso mejorar la eficacia del sistema de protección actual.

Concretamente, el escudo deflector cerámico empleando su adhesivo 3M original, es que logra los mejores resultados en este ensayo, logrando reducir la temperatura exterior hasta el entorno de los 70°C, muy por debajo del objetivo inicialmente establecido (100°C).

4.4 Resumen

Estudiando los datos obtenidos para cada sistema de protección en cada ensayo del plan, se observa que no hay ningún candidato que destaque en todas las categorías de ensayo, siendo necesario abordar el estudio mediante criterios de ponderación.

4.4.1 Método de ponderación

El método de ponderación propuesto consiste en valorar en orden de importancia las tres características estudiadas (eficiencia térmica, % reducción de peso y adherencia), asignando a la más importante el valor 3 y a la menos importante el valor 1.

A continuación, se ordenan los resultados obtenidos para cada uno de los 6 sistemas de protección estudiados para cada característica, de forma que se le asignan 6 puntos al sistema que presente mejor rendimiento para una categoría dada, 5 al siguiente mejor, así hasta asignar 1 punto al sistema que ofrece peor rendimiento para la característica evaluada.

A continuación multiplicamos la puntuación obtenida por cada sistema por el valor de importancia asignado a cada característica, obteniendo así un valor ponderado para cada sistema en cada categoría. Sumando las puntuaciones ponderadas de cada sistema de protección, obtenemos el valor ponderado global de cada sistema, el cual representa

4.4.2 Matriz de ponderación

La figura 14 muestra la matriz de ponderación obtenida aplicando este método, considerando los siguientes criterios de importancia:

- ✓ Eficacia de protección térmica: 3 (el más importante)
- ✓ Reducción de peso: 2 (importancia media)
- ✓ Adherencia del sistema: 1 (el menos importante)

Como puede observarse, los escudos cerámicos empleando el adhesivo 3M de origen son los que consiguen una mayor

puntuación en la matriz de ponderación, seguido por la cinta térmica adhesiva.

En función de la priorización realizada, los resultados de la ponderación pueden variar, apuntando al empleo de uno u otro sistema de protección en función de las características de la zona que se desea proteger.

5 Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, puede concluirse que el plan de ensayos desarrollado por TITANIA para abordar el estudio sobre la viabilidad técnica de reducción de peso del sistema de protección térmica ha sido eficaz.

El sistema de ponderación sugerido, empleando los datos obtenidos en los distintos ensayos, permite discriminar la mejor solución de protección térmica en base a los requisitos técnicos de cada zona del monoplaza a proteger.

A este respecto, disponer de datos cuantificados sobre peso, adherencia y eficacia de protección térmica de los sistemas estudiados, permite a los ingenieros de las distintas competiciones buscar y aprovechar los resquicios de modificaciones que el reglamento de competición permite. Y es que tras la potencia del motor y la aerodinámica (ambos factores limitados por el reglamento en F2 y F3), el peso total es tercer mayor condicionante para el rendimiento en carrera del monoplaza.

Haciendo uso de los datos recabados en el presente trabajo, se puede plantear la sustitución de elementos de protección más pesados por otros mucho más ligeros, siempre que la demanda de protección térmica lo permita. O por el contrario, incrementar la eficacia de la protección de una zona especialmente crítica, a pesar del incremento de peso que conlleva.

Jugando con estos parámetros, y contando siempre con la habilidad del piloto, los ingenieros logran esas pocas milésimas que pueden marcar la diferencia a final del campeonato.

Referencias

- [1] UNE-EN ISO 2409, *Pinturas y barnices. Ensayo de corte por enrejado*. Comité Técnico AEN/CTN 48 - PINTURAS Y BARNICES. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2013)
- [2] UNE- EN ISO 4624, *Pinturas y barnices. Ensayo de adherencia por tracción*. Comité Técnico AEN/CTN 48 - PINTURAS Y BARNICES. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2016)
- [3] ASTM-D3330, Standard Test Method for Peel Adhesion of Pressure-Sensitive Tape. Developed by Subcommittee: D10.14. American Society of Testing Materials, ASTM (2010)

