

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE PINTURA PARA USO EN UN VEHÍCULO LANZADOR

G. Suarez^a, N. Mattioli^a, E. Mikkelson^a, H. Vilaseca^b, S. Feldman^b

^a Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA), Universidad Nacional de La Plata (UNLP) - Av. 7 776, La Plata, Buenos Aires (CP: 1900), Argentina.

^b Vehículos Espaciales de Nueva Generación (VENG) – Av. Paseo Colón 505, CABA (CP: 1063), Argentina.

Correo electrónico: sfeldman@veng.com.ar

RESUMEN

El recubrimiento de un vehículo lanzador desempeña múltiples funciones, pero dos de ellas destacan en particular: la protección contra la corrosión de los materiales que conforman la estructura del vehículo, y el control térmico durante el tiempo de rampa en el PAD de lanzamiento.

Con el objetivo de seleccionar el recubrimiento más adecuado, se lleva a cabo una campaña de ensayos. En esta etapa, se busca asegurar la compatibilidad con los diversos sustratos, evaluar la adhesividad, medir la resistencia a la corrosión mediante pruebas de niebla salina, analizar la compatibilidad química con líquidos que pueden interactuar (como el oxígeno líquido y el RP1) y comprobar la resistencia a las temperaturas de exposición mediante ciclos térmicos.

Posteriormente, se procede a implementar procedimientos e instalaciones lo más simples y económicos posibles para llevar a cabo la aplicación del recubrimiento en los distintos módulos que componen el vehículo. Este enfoque se adopta con el objetivo de optimizar los recursos y garantizar la eficacia del proceso de recubrimiento.

De esta manera, se logra avanzar en la selección y aplicación del recubrimiento más idóneo para cumplir con los requisitos de protección contra la corrosión y control térmico en el vehículo lanzador.

Palabras clave: vehículo lanzador, protección a la corrosión, control térmico, pintura, recubrimiento

INTRODUCCIÓN

Para controlar los intercambios de calor que ocurren en los sistemas espaciales y garantizar su correcto funcionamiento, se emplean diversas estrategias. Uno de los métodos utilizados para implementar un sistema de protección térmica en un vehículo lanzador implica el uso de un conjunto de recubrimientos y pinturas que cumplen con requisitos técnicos específicos. Estos recubrimientos y pinturas, en esencia, evitan que las diferentes secciones del vehículo superen ciertas cargas térmicas que podrían ocasionar problemas estructurales y/o afectar el funcionamiento adecuado de los componentes.

Dependiendo del régimen de vuelo y la geometría de la cofia, los valores de temperatura en la punta pueden alcanzar aproximadamente los 700°C, mientras que en el fuselaje se mantienen alrededor de los 100°C. Por otro lado, las temperaturas en los tanques de líquidos criogénicos se encuentran en un rango de cercano a -180°C.

Se pueden observar ejemplos de pinturas de control térmico en diferentes lanzadores (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estas pinturas se aplican en áreas pintadas de blanco y negro para lograr las temperaturas de equilibrio deseadas en el diseño. Con la excepción de los logotipos y emblemas, la mayoría de los vehículos lanzadores se recubren con pinturas blancas. Esta elección se basa en consideraciones térmicas y de transferencia de calor. La pintura blanca refleja la mayor cantidad de radiación incidente, actuando como un regulador térmico y generando incrementos de temperatura más bajos en esas secciones.



Figura 1. Ejemplos de vehículos con secciones blancas y negras.

Fuente: Arianespace | NASA

Los recubrimientos y materiales superficiales con características específicas de absorción y emisión de calor se utilizan comúnmente como técnicas pasivas de control térmico y son útiles para mantener las temperaturas del vehículo lanzador dentro de límites aceptables. Estos recubrimientos deben cumplir

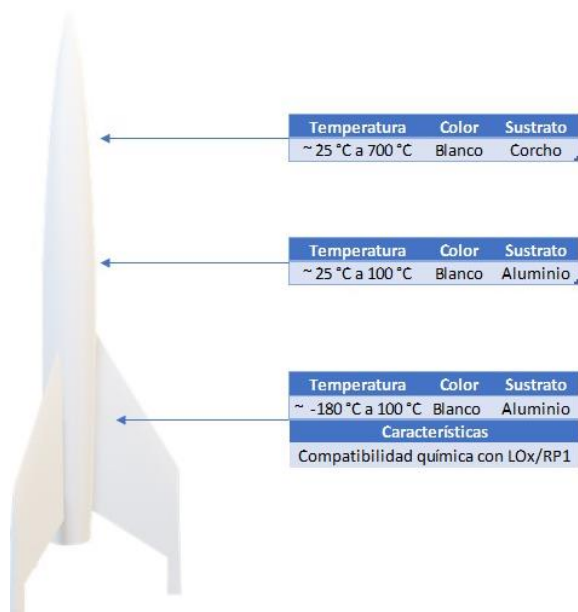


Figura 2. Resumen de los requerimientos técnicos del recubrimiento.

con diversos requisitos técnicos y de compatibilidad, incluida la compatibilidad con el sustrato en términos físicos y químicos. Para cumplir con estos requisitos, se buscaron diferentes proveedores que ofrecieran productos que cumplan las demandas técnicas. La falta de implementación de un sistema de control y protección térmica efectivo para las partes del vehículo lanzador puede ocasionar fallas estructurales y/o operativas.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** proporciona un resumen de los requisitos técnicos que deben cumplir los recubrimientos utilizados en diferentes secciones del vehículo lanzador, como la zona de la cofia (zona superior), la zona del fuselaje, los tanques (zonas media e inferior) y la zona de la antena (zona media). Las principales características que deben tener las pinturas incluyen la compatibilidad con el sustrato, resistencia térmica en diferentes rangos de temperatura y ser de color blanco.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Tabla 1, se mencionan los proveedores de recubrimientos y pinturas, a nivel nacional e internacional, los productos ofrecidos y/o recomendados por cada uno, en función de las especificaciones técnicas requeridas.

Tabla 1. Proveedores seleccionados y sus principales características.

| Origen | Proveedor | Ventajas |
|---------------|-----------|---|
| Internacional | P1 | <ul style="list-style-type: none"> · Gran variedad en productos disponibles (recubrimientos, pinturas y primer). · Productos calificados para la industria aeroespacial. · Capacidad de brindar información técnica y responder cualquier inquietud. |
| Nacional | P2 | <ul style="list-style-type: none"> · Productos calificados para la industria aeronáutica y aviónica. · Muchos años de experiencia en el rubro. · Capacidad de brindar información y responder cualquier inquietud. |
| Nacional | P3 | <ul style="list-style-type: none"> · Gran variedad de productos destinados a la industria química, petroquímica, de oíl y gas. |

Luego de conversar con los responsables técnicos de cada proveedor, los tipos de pinturas recomendados fueron:

1. Epoxy aeronáutico: es un tipo de resina termo endurecible con estándares de la industria aeroespacial
2. Poliuretano aeronáutico: polímero de alta resistencia que cumple con los estándares aeroespaciales
3. Epoxy industrial: resina termo endurecible para recubrir estructuras con fines fabriles
4. Orgánico: compuesta por distintos materiales de origen orgánico

METODOLOGÍA

A partir de los datos presentados anteriormente, se construyeron diferentes probetas, las mismas están formadas por el sustrato (aluminio y/o corcho) y sobre él, se recubrieron con los distintos tipos de pinturas. Luego se verificó la calidad de estos para poder descartar las pinturas que no cumplen con los requerimientos seleccionados previamente.

Para aplicar la pintura se utiliza una cámara de pintado, ligeramente presurizada, con temperatura y humedad controlada. El personal especializado utiliza técnicas convencionales de aplicación de pintura con pistolas de alta presión. Todo esto para poder garantizar una correcta aplicación del producto y su posterior curado.

En lo referente a la verificación de la calidad de la pintura para conocer si las mismas cumplen requerimientos técnicos elegidos, se utilizaron los criterios de clasificación indicados en las distintas normas internacionales utilizadas. En la mayoría de los casos se clasifica en “Aprobado” o “No aprobado”.

ESQUEMAS DE PINTADO Y TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Después de revisar la información provista por los distintos fabricantes de las pinturas, sobre las mejores combinaciones de los distintos tipos de recubrimientos, se desarrollan 7 esquemas de pintado (4 para el sustrato de aluminio y 3 para el sustrato de corcho) que se presentan en la Tabla 3 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La calidad de cada esquema de pintado se verifica mediante distintos ensayos que se describen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**, con el fin de poder identificar cuál se encuentra más alineada con los requerimientos técnicos solicitados.

Tabla 3. Esquema de pintado de los recubrimientos utilizados (Aluminio).

| <i>Ref.</i> | <i>Marca</i> | <i>Tipo</i> | <i>N° de manos</i> |
|-------------|--------------|----------------------------------|--------------------|
| <i>I</i> | <i>P2</i> | <i>Epoxy aeronáutico</i> | <i>2</i> |
| <i>II</i> | <i>P2</i> | <i>Poliuretánico aeronáutico</i> | <i>2</i> |
| <i>III</i> | <i>P3</i> | <i>Epoxy industrial</i> | <i>2</i> |
| <i>IV</i> | <i>P1</i> | <i>Orgánico</i> | <i>2</i> |

Tabla 2. Esquemas de pintado de los recubrimientos utilizados (Corcho).

| <i>Ref.</i> | <i>Marca</i> | <i>Tipo</i> | <i>N° de manos</i> |
|-------------|--------------|----------------------------------|--------------------|
| <i>V</i> | <i>P2</i> | <i>Poliuretánico aeronáutico</i> | <i>2</i> |
| <i>VI</i> | <i>P2</i> | <i>Poliuretánico aeronáutico</i> | <i>1</i> |
| <i>VII</i> | <i>P1</i> | <i>Orgánico</i> | <i>2</i> |

Es menester considerar la masa que agrega el recubrimiento al vehículo lanzador una vez aplicado. Esto se evidencia con la densidad superficial [g/m^2], que se calcula en base a las diferencias de pesos (antes y después de pintar) y las medidas de las superficies de cada probeta por cada esquema de pintado utilizado. De esa manera obtendremos una referencia de la cantidad de masa que nos agrega cada esquema de pintado por metro cuadrado de superficie pintada. Con los datos recaudados se llega a los siguientes resultados informados en la Tabla 4.

Tabla 4. Densidad superficial promedio por tipo de sustrato y esquema de pintado.

| Aluminio | | Corcho | |
|--------------------|---|--------------------|---|
| Esquema de pintado | Densidad superficial promedio (g/m ²) | Esquema de pintado | Densidad superficial promedio (g/m ²) |
| P2 I | 159 ± 16 | P2 V | 284 ± 18 |
| P2 II | 165 ± 9 | P2 VI | 143 ± 14 |
| P3 III | 306 ± 16 | P1 VII | No disponible |
| P1 IV | No disponible | | |

Para garantizar una correcta performance de los recubrimientos seleccionados como posibles candidatos para usar en el vehículo lanzador, se realiza una serie de ensayos y verificaciones cuyo objetivo es asegurar que estos cumplan con los requerimientos técnicos mencionados anteriormente. Se toman como referencias y criterios de clasificación distintas normas internacionales (ej. ISO, IRAM, etc.) correspondientes a cada ensayo. En la siguiente tabla, se mencionan los ensayos llevados a cabo, las normas utilizadas para cada uno de ellos, y sobre qué sustratos fueron evaluados.

Tabla 5. Resumen de ensayos, normas y sustratos.

| Ensayos | Normas | Sustratos ensayados |
|---|--------------|---|
| Adhesividad | ISO 2409 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 Corcho fenólico |
| Niebla Salina | ISO 9227 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 |
| Ciclado Térmico (entre -180 °C / 25 °C) | ISO 14188 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 |
| Compatibilidad Química frente a agente combustible (Líquido I) | ISO 2812 – 1 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 |
| Compatibilidad Química frente a agente comburente (Líquido II) | ISO 2812 – 1 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 |
| Compatibilidad Química frente a un alcohol secundario (Líquido III) | ISO 2812 – 1 | Aluminio 2219 Aluminio 6061 |

ENSAYO DE ADHESIVIDAD

El objetivo es evaluar la resistencia de un recubrimiento a la separación del sustrato cuando se realiza, sobre el mismo, un corte que llega hasta la superficie de la probeta. De manera simplificada, la norma ISO 2409 propone realizar un patrón conformado por seis cortes paralelos en el revestimiento y otros seis cortes perpendiculares a los primeros, penetrando hasta el sustrato. La norma indica que la separación de los cortes en cada dirección debe ser igual y dependerá del espesor del revestimiento y del tipo de sustrato. Luego, se eliminan las partículas sueltas mediante una limpieza con pincel realizada de manera manual, el corte se inspecciona visualmente y se califica según lo indicado en la norma. En la Figura 3 se observa una probeta pintada con el ensayo realizado.

De todas las probetas ensayadas, no se percibe desprendimiento alguno de partículas de pintura para ningún esquema de pintado. En consecuencia, se determina que ninguna de las opciones nacionales e internacionales candidatas posee falla respecto a la adhesividad del recubrimiento en su correspondiente sustrato.

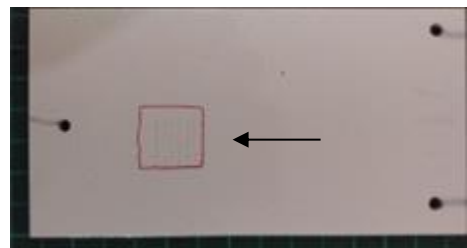


Figura 3. Probetas con recubrimiento blanco con el ensayo de adhesividad realizado. Observar el cuadrículado y sus desprendimientos

ENSAYO DE NIEBLA SALINA

El ensayo de niebla salina tiene por objetivo verificar la resistencia a la corrosión adicional brindada por el recubrimiento. Es un ensayo particularmente útil para un análisis simple de discontinuidades, tales como poros y otros defectos en el recubrimiento.

Una cámara de niebla salina es un equipo de laboratorio planteado para realizar ensayos de corrosión de forma acelerada, el cual proporciona una atmósfera corrosiva formada por una niebla salina, controlando las variables que intervienen en el proceso (tipo de solución y concentración, temperaturas y presiones de operación, modo de pulverización, entre otras).

Para llevar a cabo el ensayo, se toma como referencia la norma ISO 9227, la cual especifica y detalla aquellas cuestiones relacionadas, mencionadas anteriormente.

En un primer paso, se limpian las probetas con alcohol isopropílico y paños de limpieza, se recubren bordes y agujeros con goma butílica, y se realiza una incisión, en forma de T, en una de las caras (Figura 4).



Figura 4. Incisión, en forma de T, sobre una de las caras de las probetas. Previo a introducirlas en la cámara de niebla salina.



Figura 5. Probetas en el interior de la cámara de niebla salina.

Las probetas se introducen en una cámara de niebla salina, sobre las cuales se atomiza una solución de cloruro de sodio (NaCl), grado analítico, de concentración determinada, durante tiempo determinado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Finalizado dicho período, se retiran las probetas, se enjuagan con agua corriente para eliminar restos de solución, y ser inspeccionadas visualmente. De este modo, se determina si la exposición a un entorno salino afecta negativamente la adherencia de los distintos esquemas de recubrimientos utilizados sobre sustratos metálicos.

Se ensaya un total de seis probetas metálicas, tres de aluminio 2219 y tres de aluminio 6061, pintadas previamente con los esquemas de pintado I, II y III.

Por un lado, las probetas de aluminio 2219 se vieron más afectadas que las probetas de aluminio 6061, observándose formación de ampollas en puntos contiguos en donde se practicaron las incisiones. En la Figura 5, Figura 6 y Figura 7, se observa que el recubrimiento II es el que presenta un mayor grado de desprendimiento.



Figura 5. Aluminio 2219. Esquema de Pintado I.



Figura 6. Aluminio 2219. Esquema de Pintado II.



Figura 7. Aluminio 2219. Esquema de Pintado III.

Por otro lado, como se puede ver en las siguientes figuras, la probeta de aluminio 6061 recubierta con esquema de pintura II es la única que presenta formación de ampollas y desprendimiento del recubrimiento en zonas adyacentes a las incisiones. Los otros esquemas de recubrimientos no presentan desperfectos.



Figura 8. Aluminio 6061.
Esquema de Pintado I.



Figura 9. Aluminio 6061.
Esquema de pintado II.



Figura 10. Aluminio 6061.
Esquema de pintado III.

ENSAYO DE COMPATIBILIDAD QUÍMICA FRENTE A AGENTES COMBUSTIBLE (LÍQUIDO I) Y COMBURENTE (LÍQUIDO II)

El ensayo de compatibilidad química frente los líquidos I y II tiene por objetivo corroborar la compatibilidad y la resistencia química de los distintos esquemas de recubrimientos utilizados sobre probetas metálicas de aluminio.

Para llevar a cabo el ensayo, se toma como referencia una adaptación a la norma IRAM 1109 – B y la norma ISO 2812 -1.

A continuación, se enuncian distintos escenarios posibles que generan la necesidad de realizar este ensayo:

- Aparición de fugas en el umbilical de carga que salpiquen la pintura.
- Aparición de manchas de combustible y/o comburente producidas durante el procedimiento propio de carga.
- Aparición de manchas de combustible y/o comburente producidas durante el procedimiento de descarga en caso de aborto de lanzamiento.
- Aparición de otros derrames que sean causas de manchas o salpicaduras en la pintura, generados por un error durante la operación y manipulación de ambos agentes químicos.

El ensayo consiste en sumergir una probeta previamente pintada en un recipiente que contenga el agente químico de interés, hasta una determinada altura, durante un determinado tiempo. Paso siguiente, se retira, y se deja escurrir unos segundos, luego se genera una presión con el dedo pulgar y se rota noventa grados. Se inspecciona visualmente si existiera la formación de ampollas, burbujas, desprendimientos de pinturas u otro cualquier defecto que puedan haberse originado como consecuencia de alguna reacción química ocurrida durante el contacto líquido/recubrimiento.



Figura 11. Inmersión de probeta en el agente químico I.

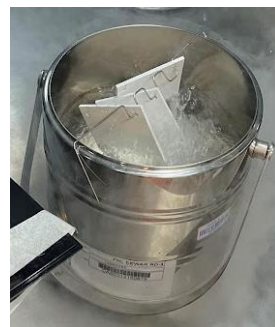


Figura 12. Inmersión de probeta en el agente químico II

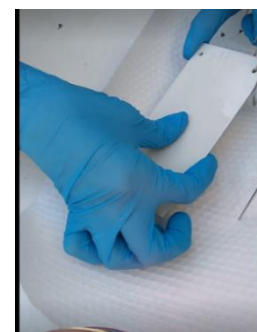


Figura 13. Inspección de aparición de defectos luego de inmersión.

El ensayo de compatibilidad química frente al líquido combustible se aplica a ocho probetas totales: cuatro de aluminio 6061 y cuatro de aluminio 2219. Se ensayan los esquemas de recubrimientos I, II, III y IV

El ensayo de compatibilidad química frente al agente comburente se aplica a un total de seis probetas de aluminio: tres de aluminio 6061 y otras tres de aluminio 2219. Aplica a los esquemas de pintura I, II y III.

Respecto al ensayo de compatibilidad química frente al agente químico I (combustible), los primeros tres esquemas de recubrimientos no mostraron falla o alteración alguna. Sin embargo, el esquema de recubrimiento orgánico resultó ser incompatible químicamente. Luego del procedimiento de inmersión, al presionar la superficie de la probeta, se observa un desprendimiento y corrimiento de la pintura. Para lo relacionado al agente químico II (comburente), todas las probetas y los esquemas de pintura utilizados no muestran discontinuidades o alteraciones.

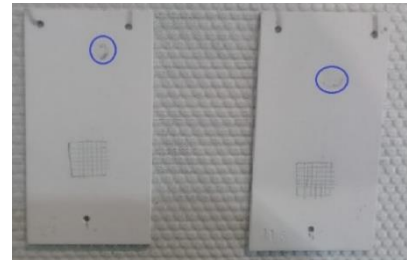


Figura 14. Probetas de Aluminio 2219 (izquierda) y 6061 (derecha), recubiertas con esquema de pintura IV, luego de inmersión en agente químico I.

ENSAYO DE COMPATIBILIDAD QUÍMICA FRENTE A AGENTE QUÍMICO (ALCOHOL SECUNDARIO) III

El ensayo de compatibilidad química frente al agente químico III tiene el mismo objetivo que los ensayos descriptos anteriormente. Tanto la norma tomada como base como el procedimiento aplicado son coincidentes.

La principal diferencia radica en que, este ensayo solo se ejecuta sobre probetas metálicas pintadas con esquema orgánico (IV). Considerando que este agente químico III es el principal agente de limpieza utilizado sobre sustrato metálico aluminio, previo a realizar un ensayo, se debe verificar si existe compatibilidad química entre el químico y el recubrimiento.

El ensayo se aplica a dos probetas metálicas, una de aluminio 6061 y otra de 2219, previamente pintadas. En ambos casos, se observa una incompatibilidad química. Luego de la inmersión, se aprecia formación de ampollas y desprendimiento de la capa de pintura.



Figura 15. Aluminio 2219, luego de inmersión en alcohol secundario.



Figura 16. Aluminio 6061T6, luego de inmersión en alcohol secundario.

ENSAYO DE CICLADO TÉRMICO

En este ensayo entre temperaturas elevadas y criogénicas se busca caracterizar, verificar, evaluar y garantizar la calidad de los recubrimientos y del procedimiento de pintado de las superficies de aluminio y esquemas de pinturas aplicadas frente a variaciones térmicas.

El procedimiento seleccionado es una modificación a la norma ISO 14188, para ser aplicable a los recubrimientos que son de base orgánica, epoxy y/o poliuretánico.

Las probetas seleccionadas fueron introducidas en la cámara térmica, programada para realizar un ciclo térmico semejante al que se muestra en la Figura 17.

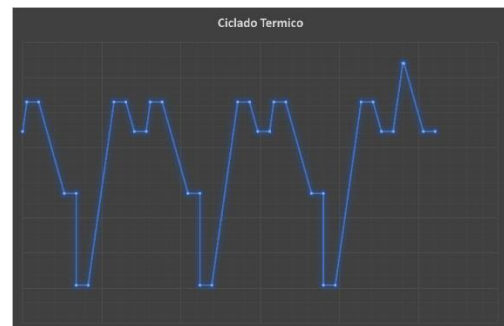


Figura 17. Esquema del ciclo térmico: 4 ciclos.



Figura 18. Ejemplo de probetas después del ensayo de ciclado térmico.

Finalizado el ciclado térmico, se inicia la inspección visual de las probetas ensayadas, en búsqueda de alteraciones o defectos (como desprendimiento, agrietamiento, descascarado del recubrimiento). Luego del examen de las probetas ensayadas (Figura 18) no se observa ningún tipo de defecto.

CONCLUSIONES

Se proponen inicialmente varios esquemas de pintado para los diferentes tipos de sustratos. Luego se seleccionan distintos ensayos para verificar la calidad y el cumplimiento de los requerimientos técnicos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas y las partes del vehículo lanzador. En la evaluación para seleccionar el proveedor de recubrimiento también se considera la calidad del servicio postventa, la disponibilidad del producto y sus características, su experiencia en el mercado, recomendaciones y normas de calidad que posee, así como también que pueda garantizar la trazabilidad de producto y que su formulación no cambie con el tiempo.

Considerando lo mencionado, se recomienda descartar la opción II del esquema de pintado (base epoxy y recubrimiento poliuretánico) de P2 por no superar de manera exitosa el ensayo de niebla salina, principalmente con el sustrato aluminio.

También se sugiere no considerar la pintura ofrecida por el proveedor P1 por no cumplir con la compatibilidad química al agente III.

Los otros esquemas de pintura han pasado exitosamente las pruebas realizadas. Sin embargo, la selección definitiva del recubrimiento y su proveedor quedará pendiente de análisis y ensayos adicionales.

REFERENCIAS

1. CIDEPINT. (s.f.). Control de calidad de películas de pinturas. Autores: Guidice; Pereyra (CIDEPINT).
2. GEMA - CTA Facultad de Ingeniería | UNLP. (s.f.). Datos de temperatura en todas las trayectorias obtenidas de los modelos matemáticos desarrollados.
3. ISO. (s.f.). Norma ISO 14188: Recubrimientos metálicos e inorgánicos. métodos de ensayo para medir la resistencia al ciclado térmico y la resistencia al shock térmico para recubrimientos de barrera térmica.
4. ISO. (s.f.). Norma ISO 15528-2013: Pinturas, barnices y materias primas para pinturas y barnices – Muestreo.
5. ISO. (s.f.). Norma ISO 2409: Ensayo de adhesividad.
6. ISO. (s.f.). Norma ISO 2812: Determinación de Resistencia a líquidos. Inmersión en Líquidos Distintos al Agua.
7. ISO. (s.f.). Norma ISO 9227: Ensayo de niebla salina.