

ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE CORCHO FENÓLICO PARA USO EN LANZADORES ESPACIALES

Bryan Chávez^a, José Sebastián Maineri López^a, Elmar Mikkelson^a, Hernán Vilaseca^b y Solange Feldman^b

Correo electrónico: sfeldman@veng.com.ar

^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.

RESUMEN

En este informe se propone realizar una campaña de ensayos con el fin de caracterizar al corcho fenólico como material a ser empleado en el sistema de protección térmica de vehículos lanzadores. Los ensayos se definen para evaluar la performance estructural, y térmica de este material, y el proceso de su aplicación y colocación en las distintas superficies. Los ensayos mecánicos seleccionados son: tracción, corte, corte aparente y clivaje, todos estos a temperatura ambiente y a una temperatura promedio de operación. Los ensayos térmicos se ejecutan a alta temperatura con aire caliente. Se realizan modelos de elementos finitos, para simular posibles defectos en dicho procedimiento, y determinar el tamaño de defecto admisible.

Palabras clave: ablativo, corcho, cofia, ensayo, simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema de Protección Térmica (TPS) de los vehículos espaciales brinda protección y aislación frente al calentamiento aerodinámico producido durante las distintas etapas de vuelo. El TPS hace uso de diferentes mecanismos físicos y químicos para el tratamiento de la energía térmica: disipación, enfriamiento, aislación y ablación. Siguiendo esta línea, los escudos térmicos pueden ser clasificados en dos grandes grupos: reutilizables y ablativos.

Los sistemas reutilizables no cambian su masa ni su composición durante la exposición al ambiente aerodinámico. Su efectividad se basa en la absorción y la irradiación de gran parte de la energía proveniente de las componentes de convección y radiación del flujo de calor aerodinámico.

Por otro lado, los sistemas ablativos hacen uso del desprendimiento de material de la capa aislante como método de disipación de energía. Este tipo de material puede ser subdividido en dos clases: carbonizados y no-carbonizados. El tipo de material ablativo carbonizado funciona a través de un fenómeno de descomposición denominado “pirólisis” que se produce en la mayor parte del material. La pirólisis genera productos gaseosos, usualmente hidrocarburos, los cuales se mueven a través de la superficie calentada hacia la capa límite, provocando la reducción del flujo convectivo que afecta al vehículo.

En síntesis, un material ablativo carbonizado genera una barrera térmica a través de la disipación de la energía gracias al “sacrificio” de una parte del material, el cual absorbe una cantidad considerable de calor.

2. METODOLOGÍA

2.1 Consideraciones preliminares

El material a utilizar está basado en un aglomerado de partículas de corcho de un tamaño determinado, unidos a través de una resina fenólica la cual constituye la matriz del material sirviendo como elemento de relleno y soporte, mientras que las partículas de corcho brindan la rigidez y las propiedades aislantes. Al trabajar como material ablativo, como se menciona en la sección anterior, basa su funcionamiento en absorber una gran cantidad de calor a través de un cambio de fase. Durante el cambio de fase, una capa de “carbón” se forma, y actúa como aislante, protegiendo el material interno y reduciendo la degradación térmica del “escudo protector” manteniendo su geometría.

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

El corcho fenólico como material ablativo posee varias ventajas, las cuales son: alta disponibilidad, fácil procesado, y la existencia de un amplio historial de trabajos espaciales probados y certificados con éxito en distintos vehículos espaciales.

2.2 Métodos de aplicación

Como se menciona anteriormente, la facilidad para trabajar con corcho como TPS es una gran ventaja a la hora de aplicarlo sobre las distintas superficies a proteger. A continuación, se describe un breve resumen del proceso de unión de las láminas:

- Cortado de las láminas.
- Mecanizado para las secciones que así lo requieran.
- Unión/pegado del material bajo presión (Figura).
- Envasado al vacío y curado del adhesivo (*vacuum bagging*).



Figura 1. Pegado de corcho sobre cofia.

3. DESARROLLO

El proceso de pegado de corcho se realiza siguiendo todas las consideraciones pertinentes de acuerdo con el fabricante del adhesivo y las normas de pegado para adhesivos epoxy sobre distintas superficies. Sin embargo, es indispensable poder evaluar dicho procedimiento para determinar si la unión es capaz de soportar las solicitaciones a las que se verá sometida en vuelo.

Considerando que no se cuenta con todas las características del corcho fenólico, y la información mecánica que se tiene del mismo es limitada, se considera necesario una caracterización del material, y a partir de ello, obtener la posibilidad de generar modelos computacionales que permitan simular de mejor manera el comportamiento que tendrá una vez pegado sobre la cofia.

Para esto, se propone una serie de ensayos que representen los esfuerzos a los que estará sometida la unión pegada entre el corcho y sustrato, de forma de verificar la correcta adherencia y, además, la obtención de las propiedades mecánicas del corcho. En este sentido, dos de los efectos más significativos que tendrá la unión serán los esfuerzos de corte y el clivaje.

Además, se realizan ensayos mecánicos para caracterizar el material y un ensayo de temperatura cualitativo para evaluar el comportamiento térmico del material.

Con los datos obtenidos se genera un modelo computacional que permite, una vez validadas las simulaciones, definir los tamaños de defectos críticos que se puedan generar en la interfaz de pegado.

Para este estudio, se utilizan láminas de 3 espesores distintos, denominados “corcho de espesor 1” al corcho de espesor más fino; “corcho de espesor 2” al corcho de espesor intermedio; “corcho de espesor 3” al corcho de espesor más grueso.

3.1 Ensayo de temperatura

El ensayo propone un método cualitativo para determinar la tolerancia a la exposición a altas temperaturas, tanto el corcho como la unión entre corcho y sustrato. Con este ensayo se busca validar el comportamiento ablativo del material y obtener datos de la protección térmica que brinda al sustrato.

Las probetas para este ensayo consisten en placas cuadradas de aluminio con corcho de cada uno de los tres espesores, pegados sobre un lado de las placas. Se ensayan 2 probetas por cada espesor de corcho hasta consumir por completo el corcho.

El ensayo se realiza con una base regulable en altura, en donde se sujeta una pistola de calor.

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

En la Figura 2 se pueden apreciar las etapas de la respuesta del corcho ante el contacto del flujo caliente, empezando por un ennegrecimiento de su superficie, pasando por un momento de incandescencia hasta formar una capa de carbón que aísla térmicamente al sustrato, hasta consumirse por completo y dejar la superficie del aluminio a la vista.



Figura 2. Etapas de trabajo ablativo del corcho.

En las siguientes figuras se muestran las curvas de temperatura medidas tanto del lado del corcho como del aluminio, para los distintos espesores de corcho ensayados. Los datos de temperatura y tiempo se presentan de forma adimensional, considerando la temperatura de referencia como la temperatura objetivo para cada espesor de corcho; y para el tiempo, se toma la duración total del ensayo como referencia.

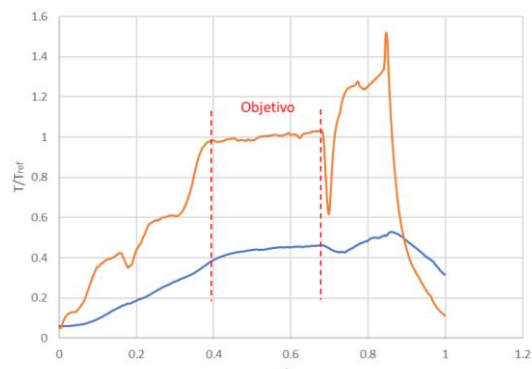


Figura 3. Temperatura vs tiempo para corcho de espesor 1.

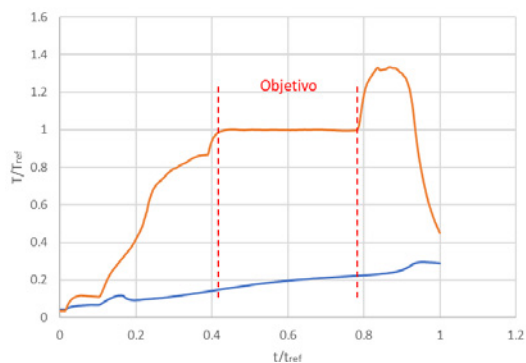


Figura 4. Temperatura vs tiempo para corcho de espesor 2.

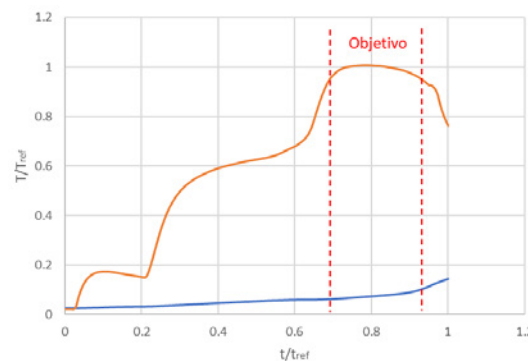


Figura 5. Temperatura vs tiempo para corcho de espesor 3.

3.2 Ensayo de tracción

El procedimiento de ensayo se basa en la norma estándar ASTM D638-14 2. El método permite obtener la tensión máxima y el módulo de elasticidad (Módulo de Young) del material.

Las probetas de menor espesor se ensayan sin extensómetro, ya que se doblan por el peso del mismo, por lo tanto, sólo podrá obtenerse un valor de tensión máxima de esta serie de probetas.

Procesando los datos, se genera una curva de ajuste y se obtienen gráficos como los que se muestran en la Figura 6. Con estas curvas de ajuste se calcula el módulo secante, y se asume al mismo como valor aproximado del módulo de elasticidad, ya que el material tiene un comportamiento que no sigue la ley de Hooke. Además, se estiman la deformación y la tensión máxima. Los datos se presentan de forma adimensional, tomando como tensión de referencia y deformación de referencia los valores promedios obtenidos de cada espesor de corcho ensayado.

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

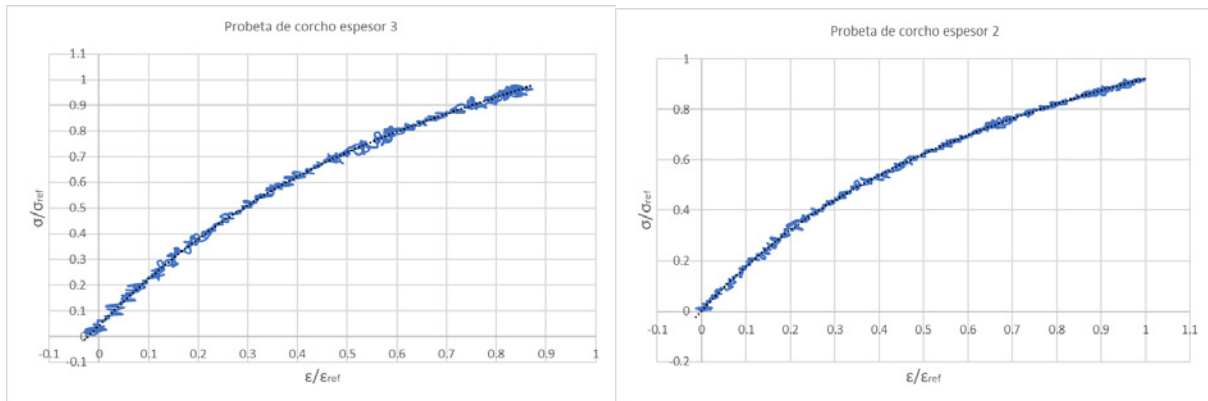


Figura 6. Tensión vs deformación para corcho de espesor 3 (izquierda) y espesor 2 (derecha).

3.3 Ensayo de corte

El procedimiento de ensayo se basa en la norma estándar ASTM C273-00 3. El ensayo de corte permite la determinación del módulo y la resistencia al corte paralelo al plano de la estructura tipo sándwich. Entiéndase estructura sándwich como la unión de sustrato-corcho-sustrato. A partir de la curva carga vs. deformación es posible determinar el esfuerzo cortante del corcho frente a cualquier carga.

En la Figura 7 se muestra el esquema de las probetas tipo sándwich y la línea de acción de carga que se deberá seguir en el ensayo.

Los datos que se extraen de la máquina de tracción son: la carga aplicada y el desplazamiento del extensómetro. Siguiendo las pautas dadas en la norma correspondiente, en función del área de pegado, el espesor de la probeta de corcho y la longitud inicial del extensómetro, se obtienen los valores de tensión y deformación (distorsión por estar sometida a corte) con las curvas respectivas.

A continuación, en la figura 8, se muestran probetas de corcho de espesor 3 y espesor 2 durante el ensayo de corte, y la forma de rotura que se produce, siendo puramente en el corcho.

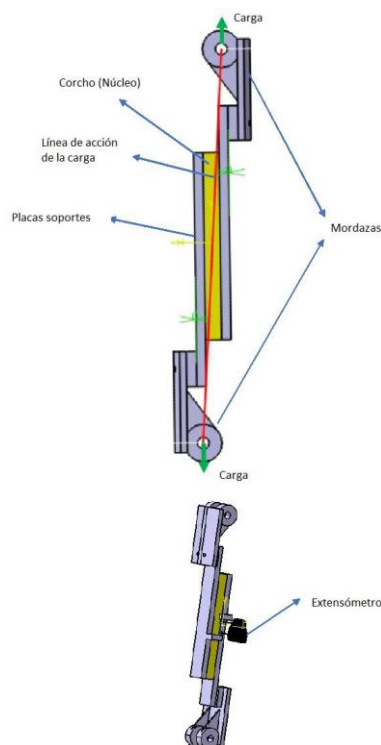


Figura 7. Esquema de la ubicación de las muestras sobre la máquina universal. Línea de acción de la fuerza de tracción.

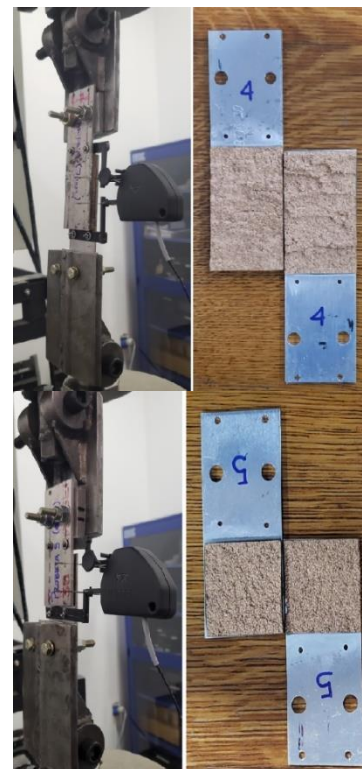


Figura 81. Probeta de corcho de espesor 3 (superior) y espesor 2 (inferior).

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

Después del procesamiento de datos, se obtienen las siguientes curvas de tensión vs. distorsión para una probeta de corcho de espesor 3 y una probeta de espesor 2. Los datos se presentan de forma adimensional, tomando como tensión de referencia y distorsión de referencia los valores promedios obtenidos para los dos espesores de corcho ensayados (Figura 9).

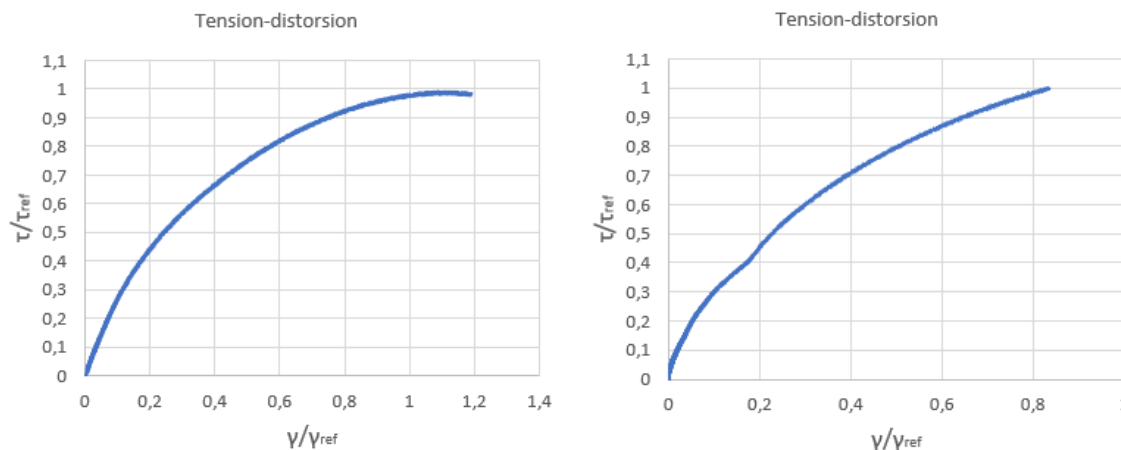


Figura 92. Tensión-distorsión para corcho de espesor 3(izquierda) y espesor 2 (derecha).

En las curvas se puede evidenciar el comportamiento no lineal del material, por lo que, siguiendo los lineamientos de la norma correspondiente, se toma la primera porción lineal de la curva para obtener el módulo de corte equivalente del material.

3.4 Ensayo de clavaje

El procedimiento de ensayo se basa en la norma estándar ASTM D 1062-02 4. El ensayo de clavaje permite la determinación de la carga máxima que puede soportar una junta pegada con adhesivo bajo condiciones de carga que representen el fenómeno de clavaje en las probetas.

En la Figura 1010 se muestra un esquema de las probetas, que consiste en corcho pegado mediante adhesivo a bases de aluminio y en la Figura 11 se muestran las probetas de espesor 3, de espesor 2, y de espesor 1 durante el ensayo

En este ensayo, el dato a obtener es la carga máxima que soporta la junta pegada al momento de la falla, por lo cual no se utiliza extensómetro para la ejecución del ensayo, y, por ende, no se obtiene ninguna curva que represente el comportamiento del material.

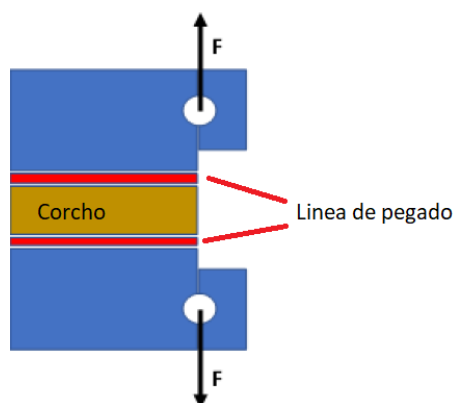


Figura 104. Esquema de las probetas de clavaje con la línea de acción de la carga.

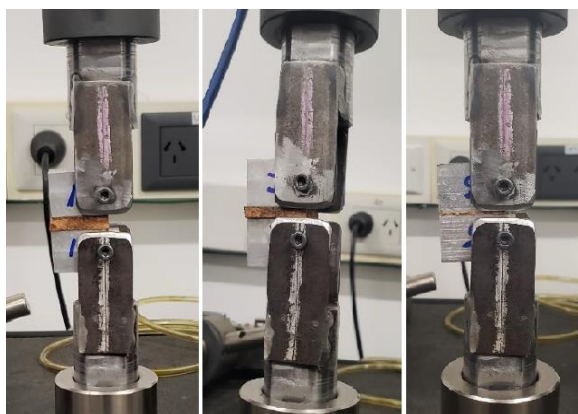


Figura 114. Probetas de espesor 3, espesor 2 y espesor 1 durante el ensayo

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

3.5 Ensayo de *Lap Shear*

El procedimiento de ensayo se basa en la norma estándar ASTM D 1002-01 5. El ensayo abarca la determinación de la resistencia al corte aparente de la probeta de corcho mediante la aplicación de carga en dirección longitudinal a la unión pegada.

Para este ensayo solo se obtiene la carga máxima de rotura, sin requerir la curva tensión vs. deformación, por lo cual no se utiliza extensómetro.

La Figura 12 muestra un esquema de las probetas utilizadas para este ensayo, la cual está basada en la norma utilizada. La Figura 13 muestra las probetas de corcho de espesor 3, de espesor 2 y de espesor 1 durante el ensayo.

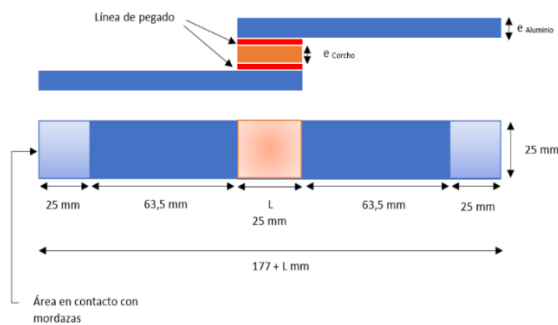


Figura 52. Esquema de las probetas para ensayo de Lap Shear.

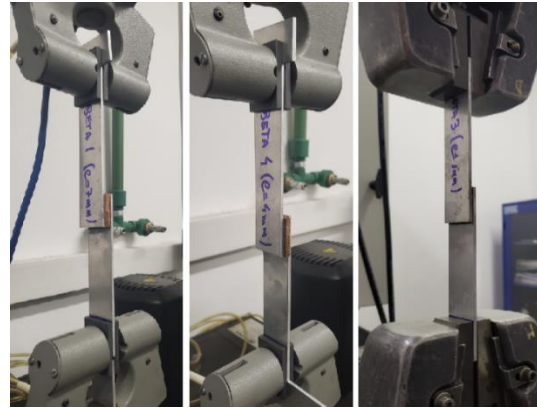


Figura 63. Probetas de corcho durante el ensayo

3.6 Simulación mediante FEM

Con los ensayos mencionados en las secciones anteriores se obtienen las propiedades mecánicas del corcho fenólico, a partir de las curvas de tensión vs. deformación tanto para tracción como para corte, evidenciando el comportamiento no lineal del material.

Con esto, se alimenta un modelo de elementos finitos, en donde se simula la unión pegada del ensayo de *Lap Shear* para validar dicho modelo, de forma que, la falla y las tensiones obtenidas sean acordes a las tensiones de falla del ensayo. El objetivo final, una vez validado el modelo, es determinar el tamaño de defecto crítico en el pegado que genere tensiones fuera del rango admisible en el material en función del espesor del corcho utilizado.

3.6.1 Defectos generados

Para las simulaciones, se proponen 4 tipos de defectos posibles en la interfaz del aluminio-adhesivo-corcho, los cuales se especifican a continuación:

- Defecto puntual en el centro del solape (Figura 14)
- Franja despegada transversalmente en el centro del solape (Figura 15)
- Franja despegada en el borde frontal del solape (Figura 5)
- Franja despegada en un borde lateral del solape (Figura 517)

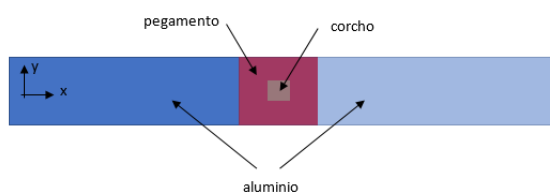


Figura 74. Probeta con defecto puntual.



Figura 15. Probeta con defecto de franja transversal.

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



Figura 16. Probeta con defecto de franja frontal.

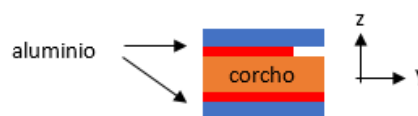


Figura 178. Probeta con defecto de franja lateral

3.6.2 Simulación corcho

Al armar las simulaciones para los distintos espesores, se encontró que las cargas aplicadas son ligeramente menores a las cargas máximas obtenidas de los ensayos, sin embargo, se obtiene que la tensión máxima de corte que alcanza la superficie del corcho es acorde a la tensión obtenida del ensayo de corte, representando de muy buena manera la forma en que trabaja y se carga el material.

En la Figura 18 se presenta la forma en que carga la probeta de corcho de espesor 2 durante la ejecución del ensayo. Se puede notar que la forma en que el corcho empieza a fallar es acorde al modelo simulado en la Figura 20, lo cual corrobora que el modelo representa la realidad. Es evidente la rotura en forma diagonal a través de la superficie lateral del corcho, tal cual lo muestra la simulación. Además, se muestran las simulaciones realizadas para cada defecto generado, tomando como tensión límite, la máxima tensión mostrada en la Figura 19.

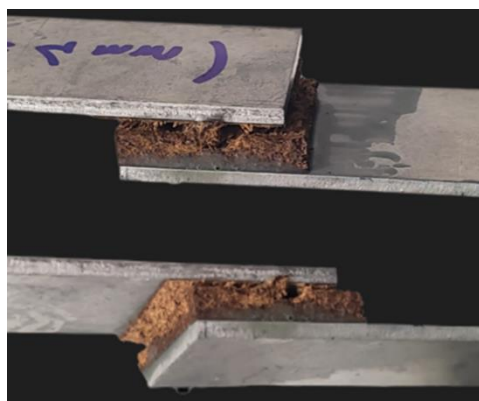


Figura 18. Probetas de Lap Shear con corcho de espesor 2 durante el ensayo.

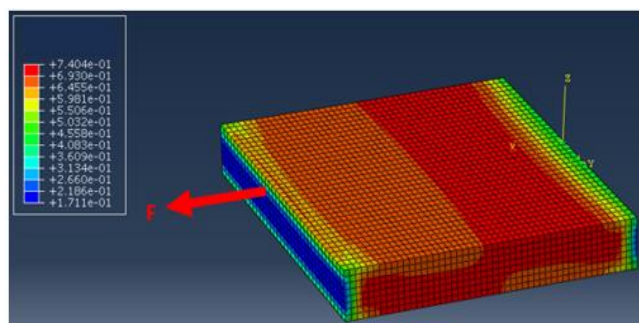


Figura 199. Tensiones en probeta de espesor 2.

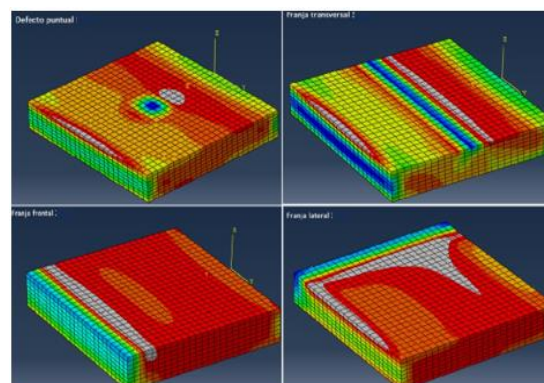


Figura 2010. Simulaciones de defectos en las probetas de corcho de espesor 2.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del corcho como material ablativo

A partir de los datos asociados a los gráficos de temperatura presentados en la sección 3.1, se obtienen los valores de temperaturas máximas alcanzadas del lado del corcho y las temperaturas correspondientes a esos puntos del aluminio.

Bryan Chávez, José Sebastián Maineri López,
Elmar Mikkelsen, Hernán Vilaseca, Solange Feldman

7mo Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica

Tabla 1. Datos de temperaturas máximas alcanzadas.

Espesor Corcho	Temperatura máxima corcho (T/Tref)	Temperatura máxima aluminio (T/Tref)	Diferencia de Temperatura (T/Tref)
Espesor 1	1,52	0,51	1,01
Espesor 2	1,42	0,22	1,20
Espesor 3	0,98	0,07	0,91

Además, en la Tabla 2 se indican los tiempos de exposición de las probetas cuando se alcanza una meseta de temperatura sobre el lado del corcho. Nuevamente, la temperatura de referencia es la temperatura objetivo para cada espesor de corcho que se buscaba alcanzar en el ensayo; mientras que el tiempo de referencia es el tiempo total de duración del ensayo.

Tabla 2. Datos de tiempos y temperaturas durante el ensayo.

Espesor Corcho	Temperatura inicial de meseta lado corcho (T/Tref)	Temperatura inicial de meseta lado aluminio (T/Tref)	Temperatura final de meseta lado corcho (T/Tref)	Temperatura final de meseta lado aluminio (T/Tref)	Diferencia de temperatura promedio (T/Tref)	Diferencia de temperatura promedio (T/Tref)
Espesor 1	0,96	0,36	1,03	0,46	0,31	0,58
Espesor 2	0,98	0,12	1,01	0,21	0,50	0,82
Espesor 3	1,00	0,07	0,98	0,10	0,20	0,91

4.2. Caracterización mecánica del corcho

A partir de los ensayos mecánicos realizados sobre el material, se obtienen los siguientes valores para las propiedades mecánicas del mismo, aclarando que, se presentan las propiedades para cada espesor de corcho, debido a que se pudo evidenciar un comportamiento distinto del material en función del espesor de la lámina de corcho utilizada. Todos los datos se presentan de forma adimensional, tomando como valores de referencia los valores de las propiedades mecánicas del corcho promediadas entre los tres espesores ensayados.

Tabla 3. Propiedades mecánicas según espesor.

	Corcho de espesor 1	Corcho de espesor 2	Corcho de espesor 3
Tensión máxima de lap shear (T/Tref)	1,30	0,89	0,79
Carga máxima de clivaje (C/Cref)	1,28	0,82	0,89
Tensión normal máxima (σ/σ_{ref})	1,17	0,86	0,97
Modulo elástico (E/Eref)	-	1,11	0,88
Deformación máxima ($\varepsilon/\varepsilon_{ref}$)	-	0,78	1,21
Módulo de corte (G/Gref)	-	1,06	0,94
Tensión tangencial máxima (τ/τ_{ref})	-	0,98	1,01

4.3. Tamaño de defectos críticos

En base a las simulaciones realizadas y las tensiones obtenidas en las probetas, se puede determinar el tamaño crítico de cada defecto generado, que provoca que el material supere la tensión de corte admisible propuesta.

En la Tabla se muestra un resumen con el tipo de defecto y el tamaño crítico del mismo.

Tabla 4. Defectos críticos en función del espesor de corcho.

	Tipo de defecto	Tamaño crítico
Espesor 2	defecto puntual	4% de área pegada
	franja transversal	12% de ancho pegado
	franja frontal	no admisible
	franja lateral	8% de ancho pegado
Espesor 3	defecto puntual	4% de área pegada
	franja transversal	12% de ancho pegado
	franja frontal	4% de ancho pegado
	franja lateral	8% de ancho pegado

5. CONCLUSIONES

Se logra caracterizar mecánicamente el corcho fenólico a través de la realización exitosa de los ensayos propuestos, en donde se concluye que el corcho con resina fenólica tiene un comportamiento que no es isotrópico ni lineal, entrando dentro de la categoría de material compuesto o plástico, en su defecto.

Además, se logra verificar y validar el comportamiento del corcho fenólico como material ablativo y aislante, protegiendo térmicamente el sustrato sobre el cual se encuentra adherido, manteniendo su temperatura muy por debajo de la temperatura que alcanza el corcho expuesto al flujo de calor. Se concluye que a medida que el espesor de corcho aumenta, la temperatura del sustrato tiende a disminuir, lo cual es evidente pues un espesor mayor del material implica una mayor disipación del calor producido. Todo esto sirve como punto de partida para poder generar modelos computacionales que permiten verificar el comportamiento del sistema de protección térmica, con el objetivo final de modelar la cofia completa con el corcho pegado a su alrededor. Con estos datos, además se definen los tamaños de defectos críticos admisibles en las juntas.

6. REFERENCIAS

1. ASTM D 6412/D 6412M-99: Standard Specification for Epoxy (Flexible) Adhesive for Bonding Metallic and Nonmetallic Materials.
2. ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
3. ASTM C273-00: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials.
4. ASTM D 1062-02: Standard Test Method for Cleavage Strength of Metal – to – Metal Adhesive Bonds.
5. ASTM D 1002-01: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single – Lap – Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal – to – Metal).