

PRIMEROS RESULTADOS DEL DESARROLLO DE COMPUESTOS HÍBRIDOS TIPO CARALL.

J. Rios^(1,2,3), G. Kokubu⁽¹⁾, G. Fernández⁽¹⁾, G. Porta⁽¹⁾, E. Chomik^(1,3), J. Balderrama^(1,2,3),
A. Cambiasso⁽²⁾, N. Fuentes^(1,3), E. Asta⁽²⁾

(1) Comisión Nacional de Energía Atómica GAEN- GIDAT- U. A. Materiales,
Av. Gral. Paz 1499, (B1650KNA) San Martín. Buenos Aires – Argentina

(2) Universidad Tecnológica Nacional – F. R. Haedo. Grupo Fractomecánica.

París 532 (B1706KNA) Haedo. Buenos Aires – Argentina

(3) Instituto de Tecnología "Prof. Jorge A. Sábato". UNSAM-CNEA
Av. Gral. Paz 1499, (B1650KNA) San Martín. Buenos Aires – Argentina

rios@cnea.gov.ar

RESUMEN

Los materiales compuestos híbridos: laminados fibra-metal, FML (Fiber Metal Laminates), consisten en láminas delgadas de aluminio que alternan con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxy. En caso de utilizar fibra de carbono el compuesto se denomina CARALL (Carbon Reinforced ALuminum Laminates).

Los materiales compuestos FML se utilizan en la industria aeronáutica por ser materiales livianos, con elevada resistencia a la propagación de fisuras, resistencia al daño acumulado y baja absorción de humedad. Es una característica de estos materiales que la propagación de fisuras tenga lugar mediante el mecanismo de "Puenteo de Fibra" (Fiber-Bridging). Cuando el extremo de una fisura se propaga en forma perpendicular a la fibra, la propagación se realiza preferentemente a través de las láminas de aluminio, acompañada por una delaminación controlada. Esto causa poco daño en las fibras que permanecen mayoritariamente intactas detrás del extremo de la fisura. Este mecanismo reduce el factor de intensidad de tensiones en el extremo de la fisura, disminuyendo su velocidad de propagación.

La utilización de los compuestos FML en estructuras aeronáuticas necesita del conocimiento de sus propiedades mecánicas, parámetros de mecánica de la fractura y de propagación de fisuras. Es por ello que, a fin de adquirir un acabado conocimiento sobre las características de estos materiales híbridos, se ha iniciado un proyecto que comprende el estudio de propiedades de compuestos CARALL, que incluye la fabricación de estos compuestos híbridos a escala de laboratorio, la obtención de probetas a partir de ellos y la realización de ensayos.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de la fabricación de laminados híbridos a partir de aleaciones de aluminio 1050 y 6061 T0 y fibras de carbono NCT-301 unidireccional preimpregnada en una resina epoxy.

Se obtuvieron dos tipos de laminados (5/4 y 4/3) variando la dirección de orientación de la fibra. Se utilizó el método de fabricación de laminado en saco de vacío y curado en autoclave. Se establecieron los procedimientos de fabricación (curado en autoclave y mecanizado de las probetas) que posibilitarán una producción en serie de estos laminados fibra-metal. Se realizó la caracterización de los compuestos híbridos así obtenidos mediante ensayos de tracción y de propagación de fisuras. Los valores de velocidad de propagación medidos durante la etapa de iniciación de la fisura en probeta CT tipo 5/4 base Al 1050 y tipo 5/4 base Al 6061 son consistentes con los antecedentes que se observan en la bibliografía.

Palabras clave: Materiales compuestos; compuestos híbridos; laminados fibra-metal; mecánica de la fractura; propagación de fisuras.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal, (Fiber Metal Laminates FML) [1], consisten en láminas delgadas de aluminio colaminadas en forma alternada con capas de fibra unidireccionales embebidas en una matriz de resina epoxy, figura 1. En caso de utilizar fibra de carbono, el compuesto se denomina CARALL (CARbon Reinforced ALuminum Laminates). Los compuestos FML se utilizan en la industria aeronáutica por ser materiales livianos, con elevada resistencia a la propagación de fisuras, resistencia al daño acumulado y baja absorción de humedad. Los mismos demuestran, además, un gran potencial de aplicación en la industria naval y de otros vehículos de transporte [2].

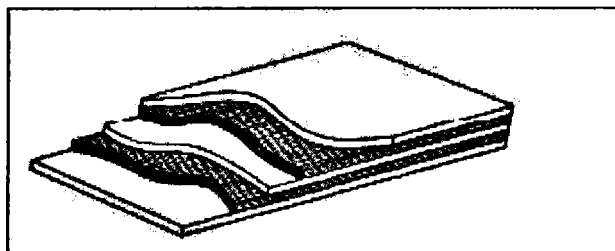


Figura 1. Laminado híbrido formado por fibra de carbono y aleación de aluminio.

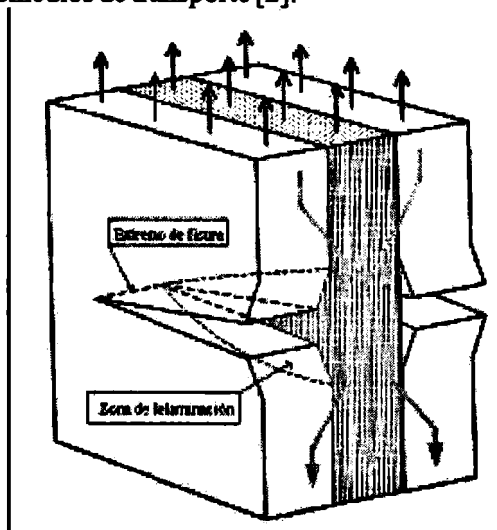


Figura 2. Esquema del mecanismo de "Puenteo de Fibra" en la propagación de fisuras en un FML.

Estos materiales compuestos tienen como característica que en ellos la propagación de fisuras tiene lugar mediante el mecanismo "Puenteo de Fibra" (Fiber-Bridging) [3]. Cuando el extremo de una fisura se propaga en forma perpendicular a la fibra, figura 2, tal propagación se realiza preferentemente a través de las láminas de aluminio, y está acompañada por una delaminación controlada, entre las láminas metálicas y la matriz polimérica. Esto causa poco daño en las fibras y trae como consecuencia que las fibras permanezcan mayoritariamente intactas detrás del extremo de la fisura. Este mecanismo es clave para reducir el factor de intensidad de tensiones en el extremo de la fisura, disminuyendo su velocidad de propagación.

En la figura 2, se muestra esquemáticamente la transferencia de cargas a la fibra de carbono en la zona fisura. Como paso previo al uso de los compuestos FML en estructuras aeronáuticas se deben conocer sus propiedades mecánicas y fractomecánicas. En este contexto hemos iniciado un proyecto [4] para el estudio de las propiedades fractomecánicas de compuestos CARALL ensayando probetas obtenidas de compuestos híbridos fabricados a escala de laboratorio.

En este trabajo se presentan los primeros resultados de la fabricación compuestos híbridos, la obtención de probetas de tracción y probetas CT (Compact Tension type specimen) para la determinación de parámetros de mecánica de la fractura, y los primeros resultados de los ensayos de propagación de fisura para caracterizar los laminados.

2. PARTE

2.1 Materiales

La puesta a punto de este proceso se hizo utilizando compuestos híbridos a partir de aleaciones de aluminio 1050 y 6160 con fibra de carbono NCT-301 unidireccional, pre-impregnada en una resina epoxy. Se utilizó la resina presente en la fibra de carbono para que en la colaminación entre las capas de fibra unidireccional y aleación de aluminio se formara un material compuesto con nuevas propiedades.

En las tablas 1 y 2 se presentan las propiedades mecánicas del Al 1050, Al 6061 T0 y de la fibra de carbono (provistas por el fabricante) utilizados en la confección del laminado híbrido [5, 6].

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Aluminio.

	E (GPa)	ν_{xy}	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_T (MPa)	ϵ (%)
1050-T0	69	0,33	20	65	20
6061-T0	69	0,33	85	150	20

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fibra de carbono NCT-301

	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{21}	G_{12} (GPa)	FPF ₁ (kN)	FPF ₂ (kN)
NCT-301	129,4	8,0	0,33	4,28	18,6	1,25

2.2 Fabricación del laminado

Las placas de aleación de aluminio provistas por el fabricante con un espesor de 1,5mm, se laminaron en frío hasta un espesor de 0,45mm, el proceso se completó con un tratamiento térmico de recocido T0 para recuperar la estructura de recristalización. Previo al colaminado con fibras, las láminas de aluminio se decaparon en una solución de hidróxido de sodio al 10% para mejorar el pegado entre la resina y la aleación de aluminio. Se fabricaron dos tipos de laminados de 120 X 120 mm, según las secuencias de apilamiento indicada a continuación.

tipo 4/3: (Al-0-Al-90-Al-0-Al) tipo 5/4 : (Al-0-Al-90-Al-90-Al-0-Al).

Donde 0 y 90 indican la orientación de la fibra de carbono con la dirección de laminación de la aleación de aluminio. El conjunto se somete a un proceso de curado en autoclave. En la figura 3 se muestra el esquema del armado del saco de vacío. El conformado de los laminados se efectuó en una matriz de aluminio previamente forrada con film desmoldante (Release Film) sobre la que se armó el saco de vacío. Para evitar daños sobre el film desmoldante y el saco de vacío se interpuso debajo y sobre la probeta una capa de tela de pelado (Peel Ply) y sobre el conjunto un paño para absorber el exceso de resina (Bleeder).

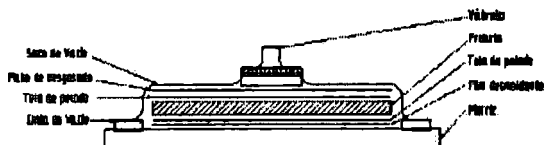


Figura 3. Esquema del saco de vacío.

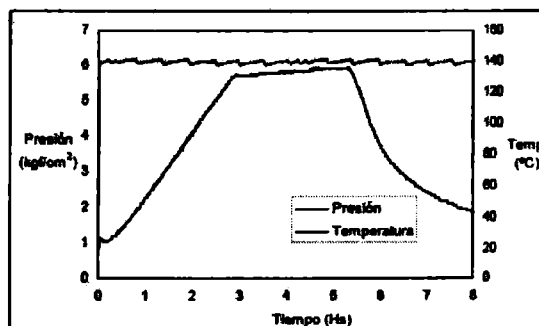


Figura 4. Ciclo de curado en autoclave. Rampa de Presión y Temperatura.

El curado se efectuó en autoclave a una presión de 6 bares y a una temperatura de 178 °C, figura 4. Se siguió la curva de polimerizado propuesta por el fabricante. De esta manera se obtuvieron laminados híbridos de aleación de aluminio con fibra de carbono tipo 5/4 de 3,6 mm de espesor y tipo 4/3 de 3 mm de espesor.

2.3 Ensayos mecánicos y de propagación de fisuras

2.3.1 Probetas de tracción

Se mecanizaron probetas de tracción de 120X20 mm. a partir de todos los laminados fabricados. Se les adhirieron en sus extremos espesores de fibra de vidrio para impedir la rotura de las mismas en la zona de las mordazas, figura 5. Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina de tracción Shimatzu instrumentada con extensómetros. Se determinó el módulo de elasticidad (E) y la tensión de fluencia utilizando el criterio ($\sigma^{0.2}$).

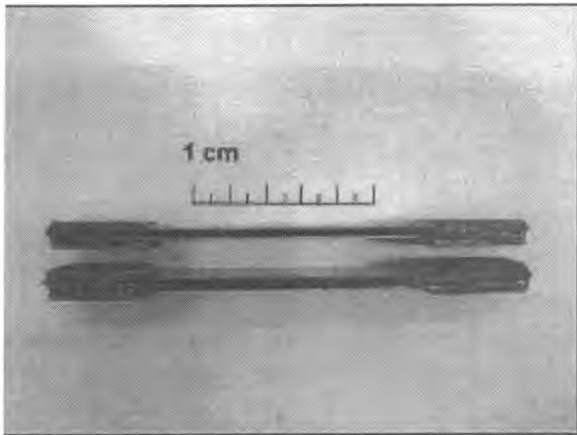


Figura 5. Probetas de tracción, laminados tipo 4/3 y 5/3.

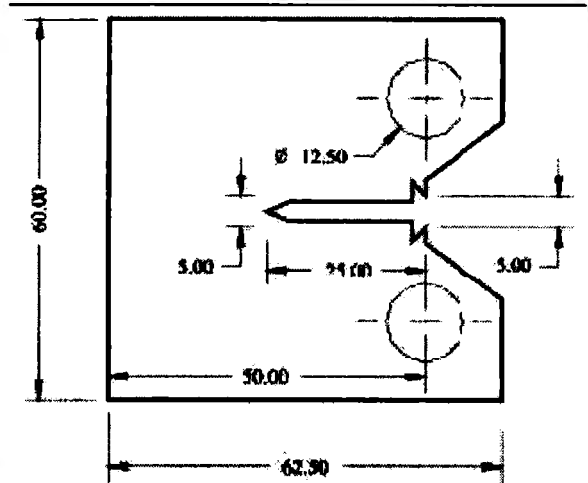
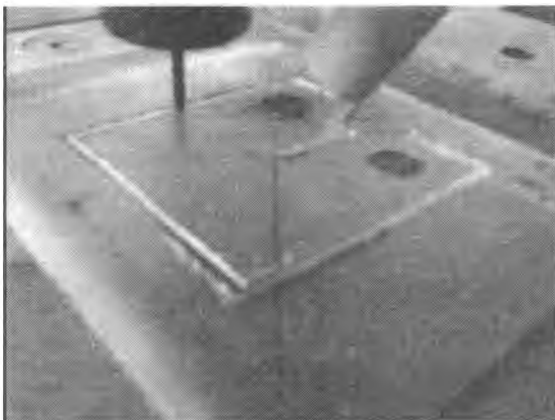


Figura 6. Probeta Tipo CT.

2.3.2 Probetas CT

Las probetas fractomecánicas compactas CT [7], utilizadas para evaluar la propagación de fisura, se fabricaron mediante mecanizado por control numérico, según plano mostrado en la figura 6.

Para la fabricación en serie, se utilizó una placa base que tiene como referencia de mecanizado los agujeros de la probeta compacta. En las figuras 7 y 8 se observan una etapa del proceso de fabricación de la probeta y la probeta terminada.



Figuras 7. Frezado CNC de probetas compactas CT.

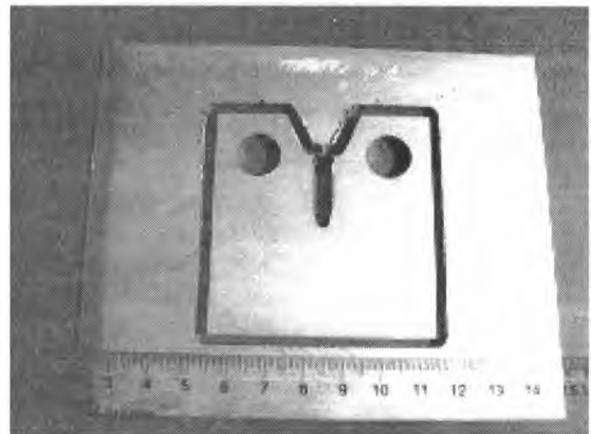


Figura 8. Probeta compactas CT al final del proceso de mecanizado.

Las probetas CT se sometieron a un ensayo de propagación de fisura por fatiga, los cuales se realizaron en una maquina de tracción servohidráulica MTS, figura 9.



Figura 9. Probeta CT montada en la máquina de tracción servohidráulica MTS.

3. MODELO

Partiendo de las propiedades provistas por los fabricantes de las fibras y las aleaciones de aluminio, se determinó el valor de las propiedades mecánicas ortotrópicas de los laminados híbridos estudiados utilizando la Teoría Clásica de Laminación [8]. En Tabla 3 se presentan los valores obtenidos a partir de dichos cálculos para los laminados con aleación de aluminio 1050 y 6061.

Tabla 3. Valores teóricos de las propiedades mecánicas de los laminados.

Aluminio	Tipo	E_x (GPa)	E_y (GPa)	ν_{xy}	G_{xy} (GPa)
1050	5/4	72,3	72,3	0,28	23,7
	4/3	75	69	0,30	24,9
6061	5/4	72,3	72,3	0,28	23,7
	4/3	75	69	0,30	24,9

Tabla 4. Resultados de los ensayos de tracción.

Aluminio	Tipo	E (GPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)
1050	5/4	71	150
	4/3	80	175

Dado que el valor del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de las dos aleaciones de aluminio utilizadas coinciden, Tabla 1 y 2, los laminados híbridos estudiados tienen igual valor de rigidez ortotrópica.

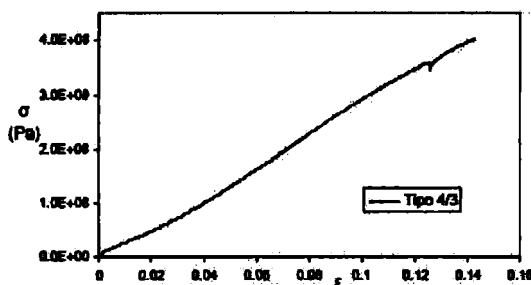
4.RESULTADOS

4.1 Compuestos híbridos

La inspección macroscópica de los laminados obtenidos con las facilidades del laboratorio descritas en el punto 2 fue muy aceptable. No se evidenciaron fallas del conjunto ni degradación en el tiempo, soportando los esfuerzos del mecanizado de probetas.

4.2 Ensayos de tracción

En la Tabla 4 se muestran los valores del módulo de elasticidad y el valor de la tensión de fluencia para los compuestos laminados híbridos, en esta primera etapa del Al 1050 solamente, ensayados en la dirección correspondiente a la dirección de laminación del aluminio coincidente con el 0 grados de la fibra. En las figuras 10 y 11 se observan las curvas tensión-deformación de las probetas de tracción tipo 4/3 y tipo 5/4 para los laminados base Al 1050 (0-90-90-0).



Figuras 10. Curvas tensión vs deformación para laminado tipo 4/3 base 1050.

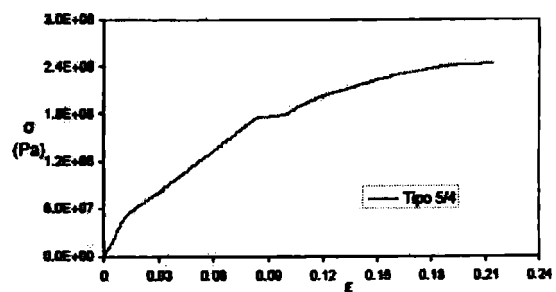
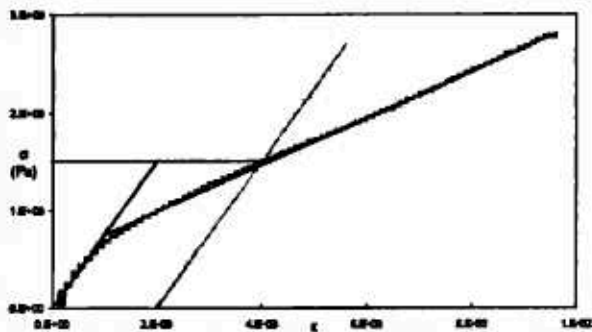


Figura 11. Curva tensión vs deformación para laminado tipo 5/4 base 1050.

En la figura 12 se observa el detalle de la determinación del módulo de elasticidad E y el valor de la tensión de fluencia a partir del límite $\sigma_{0,2}$ para la probeta tipo 5/4 base Al 1050. Al momento de la presentación de este trabajo no se cuenta con resultados de ensayos de tracción de probetas de compuestos laminados híbridos base Al 6061.



Figuras 12. Determinación del valor de la tensión admisible para la probeta tipo 5/4 base 1050.

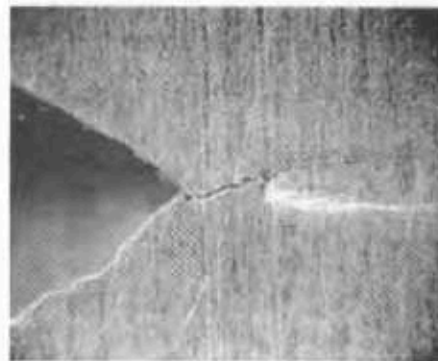


Figura 13. Se observa la entalla, la fisura y la zona deformada asociada en el Al 1050.

4.3 Ensayo de propagación de fisura

Los parámetros de fisuración por fatiga para cada laminado ensayado se muestran en la Tabla 5. En la tabla 6 se detalla la velocidad de propagación en la etapa de iniciación de la fisura en probetas CT obtenidas a partir de distintos tipos de laminados híbridos fabricados en el laboratorio.

Tabla 5. Condiciones de fisuración. $R = 0.1$

Aluminio	Tipo	ΔK_{th} (MPa m ^{1/2})	Ciclos (N)	a (mm)
1050	5/4	5,5	4,4 10 ⁴	2
	4/3	6,8	4,5 10 ⁴	2
6061	5/4	7	1 10 ⁶	1,8

Tabla 6. Velocidades de Propagación de Fisuras

Aluminio	Tipo	ΔK (MPa m ^{1/2})	$\Delta a / \Delta N$ (m/ciclos)
1050	5/4	5,5	1,4 10 ⁻⁸
	4/3	6,8	6,3 10 ⁻⁸
6061	5/4	7	2 10 ⁻⁹

Luego de la propagación de la fisura por fatiga se aplicó una carga estática que provocó la apertura de la fisura, la cual se encuentra controlada por la deformación de la resina debido a las tensiones de corte locales entre la fibra y las lámina metálica [3]. En la figura 13 se observa la apertura de la fisura (modo I) en la probeta CT y la zona de deformación plástica en el extremo de la fisura en la lámina de aluminio 1050. En la figura 14 se aprecia la apertura de la fisura en el espesor de la probeta CT tipo 5/4 base AL 1050 con apilamiento de la fibra 0-90-90-0. En la figura 15 se presenta la fisura propagada por fatiga (modo I) en la probeta CT tipo 5/4 base Al 6061.

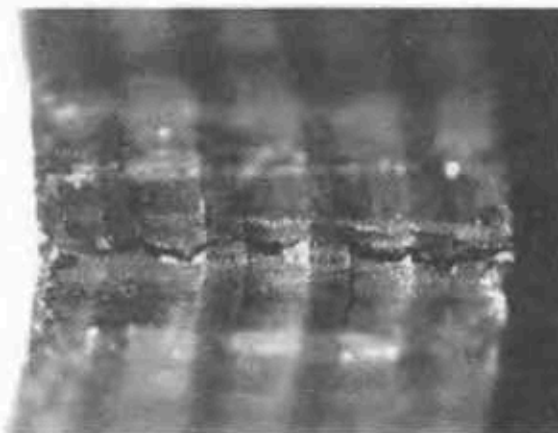


Figura 14. Fisura en el espesor de la probeta CT tipo 5/4 base Al 1050 (0-90-90-0).

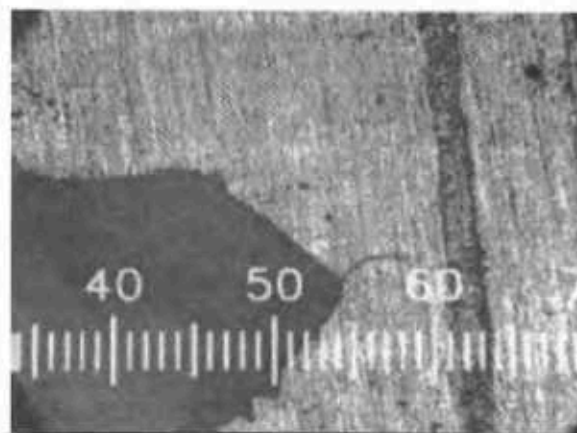


Figura 15. Vista lateral. Se observa la longitud de fisura en probeta CT tipo 5/4 base Al 6061.

En la figura 16 se observa la apertura de la fisura en la probeta CT y la zona de deformación plástica en el extremo de la fisura en la lámina de Al 6061. En la figura 17 se muestra la apertura de la fisura a lo largo del espesor de la probeta CT tipo 5/4 base Al 6061 con apilamiento de la fibra 90-0-0-90.

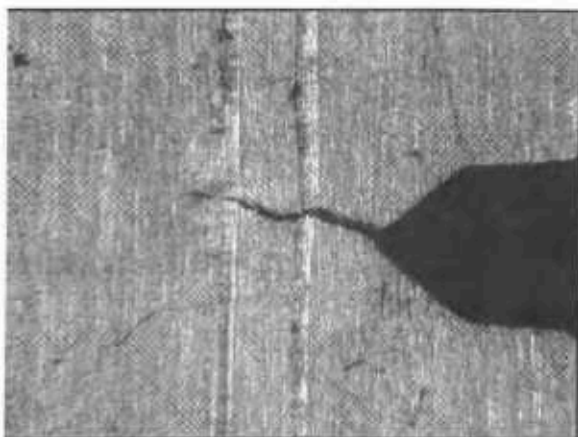


Figura 16. Se observa la entalla, la fisura y la zona deformada asociada en el Al 6061

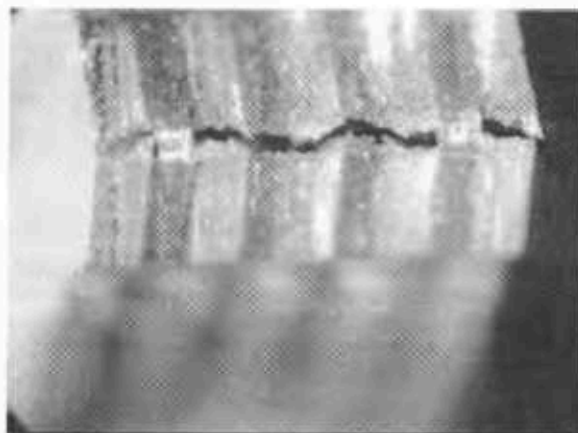


Figura 17. Fisura en el espesor de la probeta CT tipo 5/4 base Al 6061 (90-0-0-90).

5. DISCUSIÓN

A diferencia de un material continuo, donde se hubiese esperado un mayor avance de fisura en el centro de la sección, dado que es allí donde se produce un estado triple de tensiones que favorece el avance de la fisura, el análisis de la superficie de fractura de la probeta CT tipo 5/4 base Al 1050 muestra un menor avance de la fisura. La figura 18 muestra como el avance de la fisura en la lámina central de aleación aluminio, donde la dirección de las fibras de carbono vecinas es normal al plano de la fisura, es menor que en el resto de las láminas de aluminio próximas a la superficie.



Figura 18. Superficie de fisura por fatiga. Probeta CT tipo 5/4 base Al 1050.

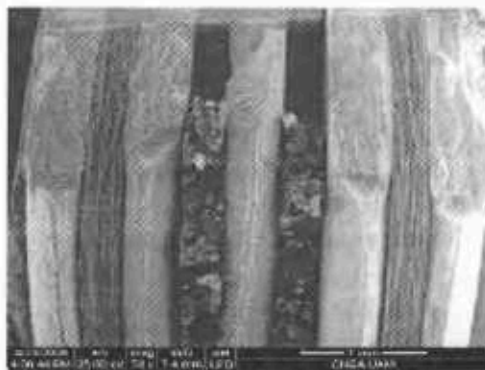


Figura 19. Micrografía SEM de la fisura por fatiga. Probeta CT tipo 5/4 base Al 1050

Esta forma diferencial del avance de la fisura muestra que en este laminado operó el mecanismo de "Puenteo de Fibra" (Fiber-Bridging) característico en este tipo de laminados híbridos. En la figura 18, en esta misma probeta se aprecia la morfología de la superficie de fractura como consecuencia de los distintos mecanismos de rotura operantes en las láminas de aleación de aluminio. En la parte superior de la figura 19 las láminas de aluminio presentan una típica superficie de fractura generada por la propagación de la fisura por fatiga. Mientras que en la parte inferior se puede ver la rotura por deformación plástica producida cuando se aplicó una carga estática que provocó la apertura de la fisura. Además se observa claramente la dirección de la fibra de carbono unidireccional.

En las figuras 14 y 17 se puede observar como las fibras de carbono cuya dirección es normal a la superficie de fractura permanecen con relativamente poco daño después de la apertura de la fisura debido a la aplicación de la carga externa. Aunque no se logró obtener exitosamente la apertura de la superficie de fractura para la probeta CT tipo 5/4 base Al 6061, es de esperar un avance mayor de la fisura en la lámina central. Con respecto a la velocidad de propagación durante la etapa de iniciación de la fisura, en probetas CT, se midieron velocidades de propagación $\Delta a / \Delta N$ de $6,3 \cdot 10^{-8}$ en probeta CT tipo 5/4 base Al 1050 y $2 \cdot 10^{-9}$ en probeta CT tipo 5/4 base Al 6061. Este último valor está de acuerdo con los valores publicados para un laminado híbrido CARALL base 7075 [10]. Es de notar que estos valores son dos órdenes de magnitud inferior al correspondiente a una lamina de aleación del aluminio de espesor similar, cuyo valor de

velocidad de propagación durante la etapa de iniciación de la fisura es de $5 \cdot 10^{-7}$ [6]. El retardo en la propagación de la fisura por fatiga, producto del mecanismo de "Punteo de Fibra" (Fiber-Bridging) hizo que fueran necesarios 1×10^6 ciclos para lograr una fisura de 1,8 mm de largo en la probeta CT tipo 5/4 base Al 6061, nuevamente comparables a los mostrados en [10]. En este tipo de laminado híbrido CARALL no se observan cambios sustanciales en el plano de avance de la fisura por fatiga manteniéndose una configuración correspondiente al modo I, figura 2, a diferencia de lo observado en otros materiales compuestos híbridos [9].

6. CONCLUSIÓN

La facilidad de pegado en vacío y curado en autoclave disponibles, resulta adecuada para la fabricación de prototipos a escala de laboratorio de materiales compuestos híbridos, laminados fibra-metal con aleaciones de aluminio. Lo cual nos está indicando que se podrá completar exitosamente la validación del proceso de fabricación. Durante la ejecución del presente trabajo, se establecieron los procedimientos de fabricación (curado en autoclave y mecanizado de las probetas) que posibilitarán una producción en serie de estos laminados fibra-metal, para cualquier tipo de aleación de aluminio que se elija. Se realizó la caracterización de los compuestos híbridos así obtenidos mediante ensayos de tracción y de propagación de fisuras. Los valores de velocidad de propagación medidos durante la etapa de iniciación de la fisura en probeta CT tipo 5/4 base Al 1050 y tipo 5/4 base Al 6061 son consistentes con los antecedentes que se observan en la bibliografía. El análisis de los resultados de los ensayos realizados en las probetas obtenidas a partir de los compuestos híbridos, laminados fibra-metal base Al 1050 y Al 6061, permitió observar la presencia del mecanismo Punteo de Fibra" (Fiber-Bridging) el cual está presente en este tipo de laminados híbridos.

Si bien no se ha completado la sistemática de ensayos para poder caracterizar completamente el material, los valores obtenidos a partir de los ensayos presentados en este trabajo muestran una buena correlación con los datos existentes en la bibliografía. Está prevista la utilización de técnicas de inspección no destructivas en la fabricación de los próximos laminados. Esto permitirá evaluar con mayor exactitud las características de fabricación del material a escala de laboratorio.

En la próxima etapa del proyecto se comenzará con la fabricación de compuestos híbridos, laminados fibra-metal, con aleaciones de aluminio 2024 y 7075 las cuales tienen aplicaciones en el campo aeronáutico y naval.

REFERENCIAS

- [1] Laurens B. Vogelesang. "Development of a New Hybrid Material (ARALL) for Aircraft Structure". Delft University of Technology. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 1983, 22, 492-496.
- [2] Palkowski H, Lange G. "Creation of tailored high-strength hybrid sandwich structures", Advanced Materials Research. 2007, 22, 27-36.
- [3] Lin CT, Kao PW. "Effect of fiber bridging on the fatigue crack propagation in carbon fiber-reinforced aluminum laminates". Materials Science & Engineering A. 1995; 190:65-72.
- [4] Proyecto UTN-F. R. Haedo – UAM – GIDAT (GAEN-CNEA), "Desarrollo y caracterización de compuestos híbridos".
- [5] Newport 301. NCT-301 Product Data Sheet. PL.NB301.020906.doc. Newport Adhesive and Composites, Inc.
- [6] W. F. Brown. "Aerospace Structural Metals Handbook". Mechanical Properties Nonferrous Alloys. AIWT-3206. Vol. 4. 1972. Page 1- 20.
- [7] Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. E 1820 – 01. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01. American Society for Testing and Materials.
- [8] Jones R. M. Mechanics of Composite Materials, Hemisphere, New York, 1975.
- [9] E. Castrodeza, J. Perez Ipiña, F. Bastian. "Experimental technics for fracture instability toughness determination of unidirectional fibre metal laminates". Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures. Vol. 25, Issue 11. Page 999-1008. November 2002.
- [10] C. T. Lin, P.W. Kao and F.S. Yang. "Fatigue behaviour of carbon fibre-reinforced aluminium laminates". Composites. Vol. 22. Numer 2. March 1991.