

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ESTUDIO DE ALEACIÓN DE ALUMINIO REFORZADA CON
MATERIALES COMPUESTOS PARA REDUCCIÓN DE PESO EN
LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

JOSÉ ANTONIO ISLAS MASCAREÑAS

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., JUNIO DEL 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**ESTUDIO DE ALEACIÓN DE ALUMINIO REFORZADA CON
MATERIALES COMPUESTOS PARA REDUCCIÓN DE PESO EN
LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

POR

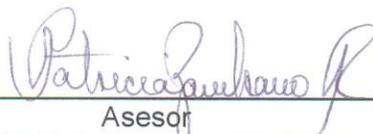
JOSÉ ANTONIO ISLAS MASCAREÑAS

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N.L., JUNIO DEL 2013

HOJA DE REVISIÓN

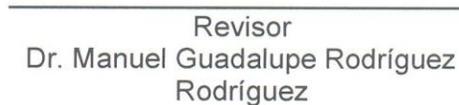
Los miembros del comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Estudio de aleación de aluminio reforzada con materiales compuestos para reducción de peso en la industria automotriz”, realizada por el alumno José Antonio Islas Mascareñas con número de matrícula 1344623, sea aceptada como opción para el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.



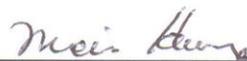
Asesor
Dra. Patricia Zambrano Robledo



Revisor
Dra. Maribel de la Garza Garza



Revisor
Dr. Manuel Guadalupe Rodríguez Rodríguez



Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de la División de Estudios de Postgrado

DEDICATORIA

*Somos una familia fuerte, con dignidad humana, con alto honor. Dios nos cuida.
C. Antonio Islas García*

A mis padres, José Antonio y Sara Olinda, el ingeniero de mi vida y la profesora de mi alma, a quienes amo y admiro. Este “pequeño logro” es de ustedes, les agradezco su amor, su cariño, su tiempo, su incondicional apoyo y su comprensión en cada paso que doy. Me hacen saber siempre lo afortunado que soy de formar parte de esta hermosa familia.

A mis hermanos, Andrés, Sara y Mauricio, con quienes he compartido momentos maravillosos y tengo siempre en mi corazón. Esto es gracias a ustedes.

A mis abuelos, Antonio, Irma; Jorge y Nely, quienes a cada paso que doy me llenan de su sabiduría, sus consejos, su incondicional amor y cariño y son la base de esta bella familia que tengo. Los llevo siempre presentes y les agradezco por todo. Los quiero.

A mi novia Perla Catalina, la doctora de mi corazón, a quien le dedico cada éxito. Simplemente gracias por tu amor, por acompañarme de la mano en cada momento y por ser mi motivación y mi más grande inspiración. Te amo.

AGRADECIMIENTOS

*Sólo un exceso es recomendable en el mundo: el exceso de gratitud.
Jean de la Bruyere*

A Dios. Por las incontables bendiciones a lo largo de mi vida.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por ser mi alma máter hasta esta etapa.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por ser mi segundo hogar tanto en la licenciatura como en la maestría.

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico tanto para la realización del proyecto como para mi persona.

A la Dra. Patricia Zambrano, por su confianza para realizar este proyecto y por su amistad.

A la Dra. Maribel de la Garza, por acompañarme y aconsejarme a lo largo de este proyecto, por su amistad y por su tiempo.

Al Dr. Moisés Hinojosa, por su asesoramiento a lo largo de mi preparación de maestría, así como por su amistad y disponibilidad.

A la empresa Metalsa S.A. de C.V; por permitirme realizar este proyecto en conjunto, especialmente a los ingenieros Oscar Sánchez, Pedro Cárdenas, Francisco González, Francisco Pacheco y al Dr. Manuel Rodríguez por su colaboración, apoyo y concejos.

A todos los doctores del DIMAT, por brindarme tanto sus conocimientos como su ayuda y apoyo durante mis estudios.

A mis compañeros de generación, Carlos, Torres, Jessy, Juanjo, Charly, Ariana, Josué, Vicky, Arizpe, Karen y Lampa, con quienes forme una gran amistad.

A todos mis compañeros y amigos del DIMAT, así como a Maribel Hernández, Flor García, Jorge Bonilla, Sergio Leal, Gabino Ramírez, Humberto Guzmán y Daniel Pérez por su amistad y apoyo.

A toda mi familia. Por todo el cariño, apoyo y motivación. Gracias.

ÍNDICE

Contenido	Pág.
Resumen	IX
Capitulo 1- Introducción	XII
Capítulo 2 – Antecedentes	6
Capítulo 3 – El Aluminio y sus aleaciones	12
3.1 – Resumen histórico.	12
3.2 – Obtención del aluminio.	13
3.3 – Propiedades del aluminio	13
3.4 – Aleaciones de aluminio.	16
3.4.1 – Clasificación de las aleaciones de aluminio.	17
3.4.2 – Clasificación de los tratamientos de aleaciones de aluminio.	18
3.5 – Incremento de la resistencia por tratamiento térmico.	19
3.5.1 – Tratamiento de solubilizado.	20
3.5.2 – Enfriamiento rápido.	21
3.5.3 – Endurecimiento por envejecimiento.	21
3.6 – Aleaciones de aluminio-magnesio-silicio.	22
3.7 – Aleación de aluminio 6061.	23
3.8 – Aplicaciones en la industria automotriz.	26
Capítulo 4 – Materiales compuestos.	28
4.1 – Definición de material compuesto.	28
4.2 – Clasificación de los materiales compuestos.	29
4.3 – Materiales compuestos reforzados con fibras.	33
4.3.1 – Compuestos reforzados con fibras de carbono.	35

4.3.1 – Compuestos reforzados con fibra de vidrio.	36
4.4 – Influencia de la longitud de las fibras.	38
4.5 – Matrices.	40
4.6 – Ventajas y desventajas de los materiales compuestos.	43
4.7 – Fabricación de materiales compuestos de fibra.	44
4.8 – Estructuras sándwich.	45
4.9 – Materiales compuestos en la industria automotriz.	45
4.10 - Adhesivos	51
Capítulo 5 – Experimentación.	52
5.1 – Material.	52
5.1.1 – Aleación de aluminio.	53
5.1.2 – Material compuesto.	56
5.1.3 – Adhesivo.	61
5.2 – Preparación metalográfica.	64
5.3 – Caracterización por medio de microscopía óptica.	69
5.4 – Microdureza.	70
5.5 – Caracterización del material compuesto.	71
5.6 - Ensayo de tensión.	72
5.6.1 – Ensayo de ángulo.	75
5.6.2 – Ensayo de tensión en aluminio.	77
5.6.3 – Ensayo de tensión en material compuesto.	78
5.6.4 – Ensayo de tensión en sándwich.	79
5.7 – Ensayo de adhesión.	80
Capítulo 6 – Resultados y discusiones.	84
6.1 – Caracterización de aleación de aluminio.	84
6.2 – Microdureza.	88
6.3 – Caracterización del material compuesto.	88
6.3.1 – Microscopía electrónica de barrido (SEM).	89
6.3.2 – Estereoscopio.	95
6.4 – Ensayo de ángulo.	98
6.5 – Ensayo de adhesión.	100

6.6 – Ensayo de tensión en aluminio.	102
6.7 – Ensayo de tensión en material compuesto.	103
6.8 – Ensayo de tensión en sándwich.	107
Capítulo 7 – Conclusiones.	109
Capítulo 8 – Recomendaciones.	111
Capítulo 9 – Referencias.	113
Apendice A	116
Lista de Tablas	117
Lista de Figuras	118
Lista de ecuaciones	123

RESUMEN

En la actualidad, en la industria automotriz existe como principal método de competencia la fabricación de vehículos cada día más eficientes tanto en potencia como en consumo de combustible, dicha eficiencia depende directamente tanto del diseño de los componentes, como del peso del vehículo, el cual depende principalmente de los materiales utilizados en su fabricación.

La industria aeroespacial fue la pionera en el uso tanto del aluminio como material principal en los años 20s, como de los materiales compuestos entre los años 60s y 70s, dichos materiales tenían lugar principalmente en las estructuras de las aeronaves.

Después de la industria aeroespacial en el uso de dichos materiales, se encuentra la industria automotriz, la cual en los últimos años ha incrementado el uso tanto de materiales compuestos como de aleaciones de aluminio en la fabricación de sus vehículos, buscando principalmente incrementar la eficiencia de sus vehículos sin sacrificar su desempeño y seguridad, lo cual año con año se logra aumentar con el uso de éstos materiales en diferentes componentes del automóvil.

Entre los componentes más comunes en el uso de aluminio y materiales compuestos esta la estructura exterior del automóvil, entre los que sobresalen el capó, el techo, las puertas, entre otros; además de componentes tanto del motor como del interior de la cabina del vehículo.

En los últimos años han sobresalido las empresas automotrices que utilizan materiales compuestos en la fabricación de sus chasis, esto debido a la gran resistencia que presentan dichos materiales, los cuales comúnmente se juntan con el aluminio para darle mayor resistencia al impacto como para formar una estructura con características tanto dúctiles como frágiles.

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de los materiales basados en un componente metálico (aluminio) reforzado con material compuesto (fibra de carbono) con distintas superficies (fibra de carbono y fibra de vidrio), utilizando adhesivos industriales para formar una estructura, con la cual se pretende evaluar la posible sustitución del acero como material utilizado en la fabricación del chasis de los vehículos comerciales de carga, así como tomarlo en cuenta para utilizarse en cualquier otra aplicación automotriz. Ésta estructura tendrá la ventaja competitiva de reducir el peso total del vehículo y permitirá al usuario reducir los costos de consumo de combustible aumentando su eficiencia, incrementando también las capacidades de carga durante el transporte.

Para validar la factibilidad del nuevo prototipo se realizarán pruebas a los distintos materiales que estarán interactuando con el nuevo chasis reforzado, tanto individualmente como en estructura, contemplando diferentes diseños que permitan cumplir con las propiedades mecánicas estructurales mismas de un chasis utilizado en la actualidad.

Para realizar dichas pruebas se utilizó aleación extruida de aluminio 6061, al cual se le llevo a cabo un tratamiento térmico T6, la cual fue ensayada a tensión individualmente. Las muestras tanto deformadas como no deformadas fueron objeto de ensayos de microdureza Vickers y se le realizo un estudio metalográfico para identificar lo que está generando los cambios en la dureza del material debido a la deformación.

Para reforzar al material metálico, se utilizó como material compuesto la fibra de carbono, la cual se obtuvo por el método de pultrusión, esto para formar un perfil estructural de alta resistencia, el cual formará parte de la estructura tipo “sándwich” junto con la aleación de aluminio.

Se obtuvo el material compuesto con dos distintas superficies, una con fibra de carbono y otra con fibra de vidrio para comparar la adhesión de ambas superficies con la aleación de aluminio, además de analizar la diferencia de resistencia debido a la diferencia de material.

Se realizó un ensayo de adhesión a traslape, utilizando una probeta de aluminio con una de material compuesto y se ensayó axialmente para determinar la resistencia del adhesivo y conocer la compatibilidad del adhesivo con las diferentes superficies. Los ensayos se realizaron a 2, 5 y 12 días de curado para conocer la resistencia que presenta el adhesivo a diferentes tiempos de curado y determinar el tiempo de curado mínimo necesario para obtener una resistencia suficiente para ser utilizado estructuralmente.

El material compuesto también fue objeto de pruebas de tensión utilizando diferentes orientaciones, 0° y 45° , para determinar cuál es la orientación adecuada para obtener los resultados óptimos.

Utilizando la orientación adecuada, se elaboraron estructuras tipo “sándwich” como probeta de tensión y como probeta para evaluar el comportamiento de la estructura perforada, esto debido a que entre los principales puntos críticos se encuentran tanto las zonas centrales de los largueros, como las perforaciones para atornillar los distintos elementos del vehículo al chasis.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

*Todo comienzo tiene su encanto.
Johann Wolfgang Goethe*

La importancia de los materiales en nuestra cultura es mayor de lo que habitualmente se cree. Cada segmento de nuestra vida cotidiana está influenciado en mayor o menor grado por los mismos, por ejemplo en transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, recreación y alimentación. Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades [1].

Durante los últimos años la tendencia es clara con respecto al procesamiento de materiales y se han generado medidas más comprometidas con el medio ambiente. Las políticas nacionales e internacionales están realizando esfuerzos importantes a nivel de investigación para que se consigan avances tecnológicos menos dañinos para el entorno [2].

En muchas de las tecnologías emergentes en la actualidad, se hace hincapié en las propiedades mecánicas de los materiales que se usan. Por ejemplo, en la fabricación de aviones, las aleaciones de aluminio o los materiales compuestos reforzados con carbono, usados para componentes de aviones, deben ser ligeros, resistentes, y deben soportar cargas mecánicas cíclicas durante un periodo largo y predecible [3].

El sector automovilístico no se encuentra al margen de estas políticas, y dado que es un sector altamente contaminante, está trabajando fuertemente desde diferentes líneas estratégicas, teniendo como objetivo principal la reducción en el consumo de los combustibles fósiles. Para ello el sector se enfrenta con dos alternativas, la primera es la obtención de fuentes de energía alternas, y la segunda es obtener una eficiencia mayor de los automóviles. Una forma de llevar a cabo la reducción del consumo de combustibles, es mediante la disminución del peso de los componentes de un automóvil, mediante el desarrollo y aplicación de materiales más ligeros que proporcionen propiedades mecánicas superiores [2,4].

La industria automotriz ha fijado como objetivo común el reducir el consumo de combustible de los automóviles y así disminuir las emisiones de dióxido de carbono. En la actualidad, se tiene como objetivo referente a las emisiones, alcanzar 140g de CO₂ por Km. recorrido, lo que significa un consumo 25% menor que el del automóvil medio europeo de 1990. Si se reduce el peso en un 1%, el consumo de combustible decrecerá un 0.5% [4].

La sustitución de los aceros convencionales usados en la carrocería del automóvil por otros de mayor resistencia mecánica permite reducir el espesor de la lámina y por lo tanto el peso total de la carrocería entre el 25 y el 50%, situación que a su vez exige el desarrollo de nuevos grados de acero, y de nuevas técnicas de recubrimiento, de conformado y unión [5].

Tradicionalmente, la selección de materiales para el chasis de vehículos ha sido de acero al carbono, debido a su facilidad de fabricación, capacidad de absorción de energía y los costos relativamente bajos. Sin embargo, en los últimos años, la exigencia para que coincida con los nuevos objetivos como la reducción de peso, durabilidad y resistencia a los impactos ha enfocado el interés hacia otros materiales [6].

Se han diseñado un gran número de aleaciones de aluminio para satisfacer las necesidades específicas y las principales aleaciones están dentro de una serie de normas nacionales e internacionales que especifican sus composiciones y propiedades mecánicas [7].

Las ventajas de la alta relación de resistencia/peso se han aplicado a todas las formas de transporte terrestre, como lo son los vagones de ferrocarril, carros y camiones de carga, furgones y autobuses, así como los principales elementos de las estructuras de los barcos [7].

El aluminio se utilizó en la mayoría de los primeros automóviles para la carrocería así como para los componentes del motor, pero con el advenimiento del automóvil producido en masa, la cantidad de vehículos ha permanecido relativamente estática no así para los vehículos más costosos. Esto se puede atribuir a diversos factores, en particular al costo que de hecho es más elevado comparado con el acero y a los problemas iniciales con la soldadura y la reparación en caso de daños. Otra consideración significativa, en la que concierne a los automóviles, ha sido el poder disponer de materiales del tamaño necesario, la calidad y la cantidad cuando menos de dos proveedores distintos [7].

No es la opción más barata, pero dadas sus magníficas propiedades mecánicas y físicas, el aluminio ha comenzado a jugar un papel muy importante en la industria automotriz. De pocos años para acá, los bloques y/o cabezas de los motores se comenzaron a fundir en este material, sobre todo porque en las aleaciones más accesibles consigue suficiente resistencia a la fatiga y peso considerablemente menos respecto al acero. La serie 6xxx hace referencia al grupo de aleaciones de aluminio preferida por la industria aeronáutica, es mucho más resistente a la fatiga y a la compresión, además de ser aun más ligera que el aluminio común [8].

Su mayor difusión llegó a los automóviles a través de las carrocerías ASF o Aluminum Space Frame, que Ferrari y Audi hicieron famosas poco tiempo atrás. Esta técnica utiliza perfiles extruidos, láminas estampadas y algunos elementos de fundición para armar la estructura del auto mediante uniones mecánicas y por fusión [8].

Hoy en día se han comenzado a utilizar pegamentos epóxicos de alta resistencia para unir distintas piezas de aluminio, acercando su utilización a productores de menor presupuesto, como es el caso del Mastretta MXT con chasis y bastidor de aluminio “pegado”, una de las más recientes maravillas modernas [8].

La cantidad de materiales compuestos laminares diferentes es tan variada y sus aplicaciones y objetivos tan numerosos que no es posible efectuar generalizaciones en relación con su comportamiento [3].

Popularmente nombrado de ésta forma, el plástico reforzado con fibra de carbono o CRP por sus siglas en inglés, presume las mejores características de sus componentes separados. Se trata básicamente de un material conformado por un am serie de mallas o telas elaboradas con hilos de acrilonitrilo carbonizado inmersas en una pieza moldeada o inyectada, comúnmente, en una resina poliéster, generando una pieza sumamente resistente a la flexión y compresión, además de ser extremadamente ligera [8].

Gracias al proceso de fabricación de la fibra de carbono es posible elaborar prácticamente cualquier pieza, generando un producto mucho más resistente y ligero respecto a sus equivalentes metálicos [8].

Por el contrario, los procesos y baja producción de sus componentes básicos la hacer muy cara y difícil de conseguir, haciendo de la fibra de carbono uno de los materiales compuestos más caros de la industria, por lo que solo se utiliza cuando se requiere de sus características especiales, y por lo general solo en autos deportivos y de lujo [8].

El presente trabajo se enfoca al estudio de las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio de la serie 6xxx comúnmente utilizadas en la industria reforzadas con material compuesto de fibra de carbono, el cual se elaboró con dos distintas superficies, fibra de vidrio y fibra de carbono, adheridos por adhesivos estructurales, formando una estructura tipo emparedado o “sándwich” con la finalidad de determinar su resistencia y rigidez y observar si representa la mejor opción para aplicaciones estructurales en partes de un chasis automotriz teniendo como finalidad disminuir su peso y por consiguiente tener un impacto ambiental benéfico sin comprometer el nivel de seguridad e integridad de los pasajeros en comparación con los aceros utilizados actualmente. Por lo tanto se ha decidido realizar éste proyecto trabajando en conjunto con la empresa Metalsa S.A. de C.V.

Se estima que se puede conseguir una reducción en peso considerable (de 20 a 40%) en algunas partes del chasis mediante el uso de la estructura “sándwich” usando la resistencia mecánica presentada por el material compuesto y la ductilidad y resistencia al impacto del material metálico, esto sin poner en riesgo las condiciones de seguridad de los tripulantes del vehículo e incluso incrementando el control del vehículo debido a su reducción de peso.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

*El presente sólo se forma del pasado, y lo que se encuentra en el efecto estaba ya en la causa.
Henry Bergson (1933)*

Hoy en día, se hace un alto énfasis en reducir las emisiones de gas e incrementar la eficiencia del combustible en el sector de transporte, todos los fabricantes de automóviles, ensambladoras, y productores de componentes están invirtiendo significativamente en materiales de bajo peso tanto en investigación como en desarrollo y comercialización. Todo se mueve con el objetivo de incrementar el uso de materiales más ligeros que logren entrar al mercado como componentes y estructuras de los vehículos a partir de materiales ligeros. El principal obstáculo en la aplicación de los materiales ligeros es, sin duda alguna, su alto costo, por lo cual se vuelve una prioridad el generar actividades que reduzcan los costos a través del desarrollo de nuevos materiales, formando nueva tecnología y procesos de manufactura [19].

La situación actual para aplicaciones en el área automotriz comprende el uso de materiales que están obligados a mantener la integridad de la estructura, resistir la corrosión, proporcionar una alta capacidad de absorción de energía, altos valores de resistencia al esfuerzo, excelentes propiedades de conformado y además que ofrezcan ventajas al medio ambiente al generar una reducción considerable en el peso del vehículo, lo cual tiene un impacto directo en el consumo de combustible, lo que es ideal para establecer el concepto revolucionario del chasis de un automóvil [6].

Hasta ahora, la reducción de peso es aun el mayor costo efectivo cuando nos referimos a reducir el uso de combustible en el sector de transporte. Está también estimado que una reducción del 10% en el peso del vehículo resulta en un ahorro de combustible de 5 a 7 %, siempre que el tren de potencia sea reducido (o un ahorro de combustible de 3 a 4 % sin modificaciones del tren de potencia). Esto representa que por cada kilogramo de peso reducido en un vehículo es una reducción de cerca de 20kg de dióxido de carbono que es emitido al ambiente. Las sanciones por exceso de emisiones de los vehículos han asegurado que los fabricantes utilicen cada material como una variable de diseño para asegurar que el peso del vehículo se reduzca, sin comprometer la seguridad y el desempeño. Los estudios de los materiales han demostrado que el aluminio, acero avanzado de alta resistencia (AHSS), y algunos plásticos como el polipropileno (PP), poliamida (PA) y poliuretano (PU) se han convertido en las opciones preferidas para el diseño de peso ligero. [19, 20].

Los materiales han sido la columna vertebral de la industria automotriz, que está siendo afectada por la legislación de emisiones de CO₂. Para combatir esto, un motor más pequeño, turbo-carga y un menor peso son las tendencias globales que están afectando a la elección de los materiales [20].

Para lograr construcciones de bajo peso, sin compensar en rigidez, los fabricantes de automóviles han estado investigando el reemplazo del acero con aluminio, magnesio y materiales compuestos. El reciclaje y recuperación de vehículos “yonkeados”, los cual representa una recuperación del 85% del vehículo, se están manejando en la industria automotriz para adaptar tecnología de materiales ligeros y así llegar a los objetivos esperados [19].

Algunos de los hechos acerca de los materiales ligeros son los siguientes:

- El total del consumo global de materiales ligeros utilizados en equipo de transporte era 42.8 millones de toneladas/\$80.5 billones de dólares en 2006 y se ha incrementado a 68.5 millones de toneladas/\$106.4 billones de dólares en 2011, esto en base a la tasa de crecimiento anual (CAGR) de 9.9% en términos de tonelaje y 5.7% en términos de valor entre 2006 y 2011.
- El acero de alta resistencia cuenta con el más alto porcentaje total de toneladas de materiales ligeros consumido, seguido del aluminio y de los plásticos. En términos de valor, los plásticos con su relativo alto precio por unidad son el más grande segmento del mercado de materiales ligeros. El aluminio y los aceros de alta resistencia son el segundo y tercer segmento de mercado más grande, respectivamente.
- En cuanto al motor de los vehículos, particularmente los vehículos de pasajeros y camiones ligeros o tráilers, son por mucho el mayor segmento del mercado de materiales ligeros. El segmento de mercado de construcción naval es el segundo en consumo de materiales ligeros mientras que el mercado de aeronaves es el segundo en valor en los materiales ligeros consumidos [19].

Los metales, debido a su resistencia, fácil reciclaje y buenas relaciones de costo-desempeño, históricamente han sido la opción preferida para los componentes estructurales. Para un vehículo de pasajeros típico de tamaño medio, los metales constituyen cerca del 75% del peso de los vehículos, de los cuales alrededor del 60% es aceros tradicional y de alta resistencia y el 7% es AHSS. El aluminio ocupa alrededor de 89% en peso y se espera que muestre un crecimiento saludable, ya que compite con el acero y los plásticos en casi todos los componentes de un automóvil. El Magnesio (en forma de aleación), que muestra la más alta relación resistencia-peso entre los metales estructurales, también tiene un pronóstico positivo de crecimiento [20].

En cuanto al aluminio, existe un amplio rango de oportunidades de emplear aluminio en un vehículo automotriz, desde el chasis hasta la estructura del cuerpo del vehículo. El uso del aluminio ofrece un considerable potencial de reducir el peso en el cuerpo del automóvil, el cual normalmente está fabricado usando acero. El uso del aluminio en aplicaciones automotrices ha crecido sustancialmente en los últimos años. Un total de cerca de 110kg de aluminio por vehículo entre 1996 y 2000 ha aumentado a predecirse que para 2015 se estarían utilizando entre 250 y 340 kg de aluminio en el vehículo, tanto en los paneles del cuerpo como en su estructura, reduciría en gran medida el peso del mismo [19].

El mercado de materiales termoestables está viendo una respuesta mixta de los fabricantes de equipos, debido a la legislación de final de la vida del vehículo, y los problemas consiguientes de reciclaje. Mientras empresas como la japonesa Nissan, Fiat de Italia y el grupo Chrysler de EUA se están alejando de los termoestables debido a la legislación, BMW ha optado por compuestos reforzados con fibra de carbono para el chasis de su vehículo nuevo BMW Megacity. Los cierres / paneles exteriores Clase-A tales como defensas, capuchas y tapas de cubierta seguirán siendo las principales aplicaciones de los compuestos termoestables, ya que aquellos muestran una excelente resistencia y bajo peso [20].

El consumo de materiales termoestables por vehículo se espera que disminuya a menos de 4,0 kg de 4,2 kg, debido a la creciente competencia de aluminio. Los fabricantes de polímeros ponen el pedal al plástico cuando se trata del desarrollo del mercado automotriz. La búsqueda de una mayor eficiencia energética es una buena noticia para los fabricantes de polímeros. Pero algunos grados se beneficiarán más que otros, dependiendo de sus propiedades. Las características inherentes de los plásticos han sido los principales motores para su uso en vehículos. Estos incluyen peso ligero, menores costos de utillaje para grandes volúmenes y la posibilidad de ser fabricado como un componente complejo único, eliminando la necesidad de sujetadores mecánicos [20].

El contenido de plástico de un coche de pasajeros típico es 8% del peso del vehículo. Las variaciones regionales se pueden ver en el uso de plástico, donde Europa lleva una tasa tan alta como 11% del peso del vehículo. Los plásticos del interior del vehículo ocupan el 48%, los plásticos exteriores representan alrededor del 27% y los plásticos bajo el capó alrededor del 14% de total de plásticos. Materiales eléctricos y cables ocupan el 11% restante. Los componentes bajo el capó ofrecen buenos márgenes y alto potencial de penetración, sobre todo en Asia y América Latina. En los mercados maduros, como Norteamérica y Europa, los plásticos están encontrando nuevos caminos en aplicaciones interiores y exteriores [20].

A nivel mundial, la demanda de plásticos en vehículos de pasajeros se espera que crezca a 9.1 millones de toneladas en 2017 desde 5.5 millones de toneladas en la actualidad, con el PP mostrando el crecimiento más rápido. La demanda de plásticos de la industria del automóvil está destinada a crecer y mucha investigación está siendo llevada a cabo por fabricantes de equipos originales, fabricantes de piezas y los productores de plásticos para el desarrollo de plásticos de alto desempeño, de alta resistencia y para encontrar nuevas aplicaciones para estos materiales [20].

Aunque los plásticos son de peso ligero y tienen otras ventajas, su resistencia es insuficiente y esto necesita ser enfrentado a fin de que los plásticos sean usados en aplicaciones más exigentes y estructurales [20].

Debido a que es necesario conocer las propiedades mecánicas de los materiales que se piensan utilizar, se realizó la caracterización de las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio y, por separado, de la fibra de carbono con sus dos diferentes superficies mediante ensayos de tensión, los cuales se realizaron a temperatura ambiente.

Para cumplir con el objetivo de disminuir el peso de chasis es necesario el uso de materiales ligeros, como los anteriormente mencionados, por ello se

estudió el aluminio y la fibra de carbono, los cuales son materiales ligeros, no debido a su densidad, si no en base a la relación entre el módulo de Young (E) y la densidad del material (ρ), denominado rigidez específica (R_e).

$$R_e = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

También a la relación entre el esfuerzo de cedencia (σ_y) y la densidad del material (ρ), llamada esfuerzo específico (σ_e).

$$\sigma_e = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad (2)$$

CAPÍTULO 3

EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio era considerado en el siglo XIX como un metal precioso, caro y difícil de conseguir. Napoleón III utilizaba su vajilla de oro o de plata para sus reuniones de rutina y reservaba su vajilla de aluminio para honrar a sus huéspedes más distinguidos en ocasiones especiales.
Sheryll Luxton, 2003 [9]

3.1 RESUMEN HISTÓRICO

El aluminio, segundo elemento metálico más abundante en la tierra, metal que se volvió un competidor económico en aplicaciones de ingeniería a partir del siglo XIX; fue descubierto por Hans Christian Oersted en Dinamarca en 1825, pero la producción de aluminio empezó en 1854 y desde entonces ha habido un gran aumento en la producción de este metal, a tal grado que el incremento del aluminio por año es tres veces mayor al del acero. Pero no fue hasta 1886 cuando Charles Hall, en Ohio y Paul Heroult, en Francia, desarrollaron un proceso a través de electrólisis, el cual sirvió para que se acelerara la producción de este metal [10, 11].

El desarrollo de este proceso es importante debido a que es difícil la extracción del aluminio de la alúmina (Al_2O_3), por que se encuentran fuertemente enlazados [10].

El aluminio se extrae de la bauxita, cuyo nombre proviene de la provincia de Les Baux, Francia, es un mineral que contiene alrededor del 40 al 60% de alúmina hidratada junto con impurezas tales como óxido de hierro [13].

La alúmina tiene un punto de fusión de 2040°C y es muy mal conductor de la electricidad, por lo que es difícil fundirla. Para obtener el aluminio a partir de la alúmina se deben seguir otros procedimientos, debido al alto punto de fusión del mineral [13].

3.2 OBTENCIÓN DEL ALUMINIO

Primero se obtiene la alúmina, quitando las impurezas y el agua por medio de una mezcla con una solución de sosa caustica a 240°C seguido de una calcinación a 1200°C [13].

Segundo, se obtiene el aluminio a partir de la alúmina o impurezas, llevándose a cabo una electrólisis, disolviendo la alúmina en una criolita fundida (Na_2AlF_6), siendo las proporciones de 80 a 90 % de la criolita y alrededor de un 8% de alúmina y algunos aditivos. Para esto se utilizan ánodos de grafito y cátodos de aluminio donde se deposita el mismo metal. Este procedimiento es conocido como el Proceso Hall – Heroult. Son necesarias de 3.5 a 4 toneladas de bauxita para la obtención de 1.5 toneladas de aluminio [13].

3.3 PROPIEDADES DEL ALUMINIO

Las propiedades del aluminio que consiguen hacer de este metal una opción atractiva y económica son su apariencia, bajo peso, maleabilidad, sus propiedades tanto físicas como mecánicas, además de su gran resistencia a la corrosión [11].

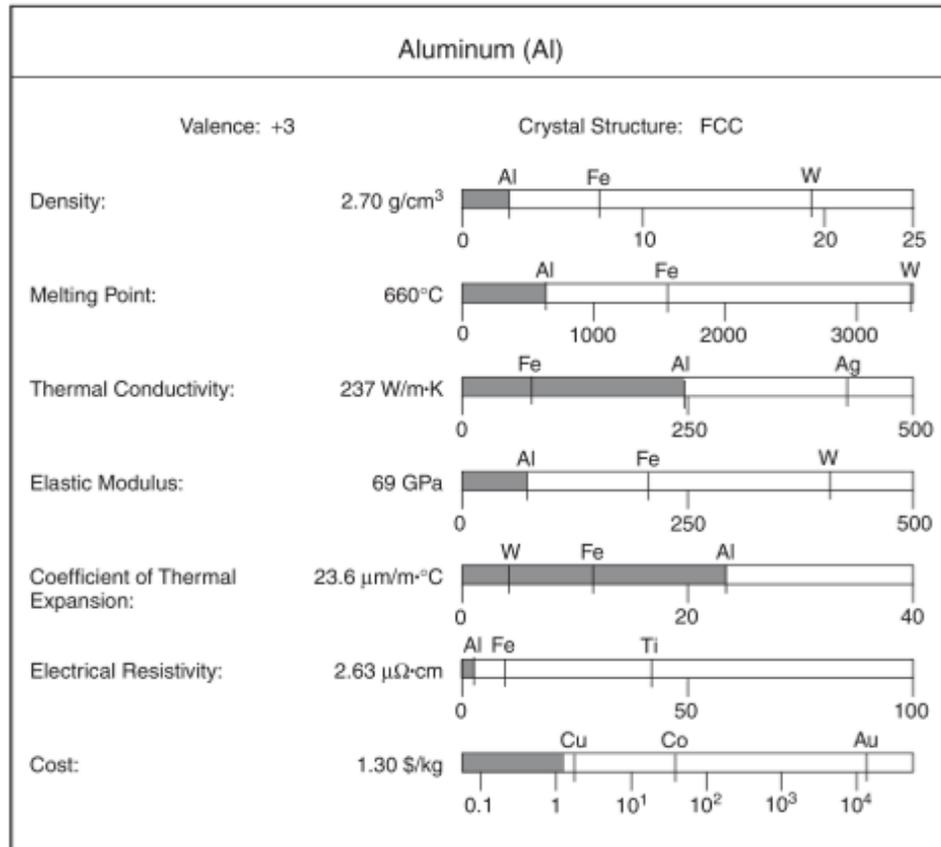


Figura 3.1 Propiedades físicas del aluminio [9].

El aluminio tiene una densidad de 2.7 g/cm³, es decir, la tercera parte de la densidad del acero, y un módulo de elasticidad de 10x10⁶ psi. A pesar de que las aleaciones de aluminio tienen propiedades a la tensión inferiores a las del acero, su resistencia específica (es decir, su relación resistencia a peso) es excelente. El aluminio se puede conformar con facilidad, tiene una elevada conductividad eléctrica y térmica, y a bajas temperaturas no presenta una transición de dúctil a frágil. No es tóxico y se puede reciclar mediante sólo el 5% de la energía que fue necesaria para su fabricación a partir de la alúmina. Ésta es la razón por la cual tiene tanto éxito el reciclaje del aluminio [3].

Las propiedades físicas benéficas del aluminio incluyen un comportamiento no magnético y su resistencia a la oxidación y a la corrosión. Sin embargo, el aluminio no exhibe un límite de resistencia a la fatiga verdadero, por lo que en algún momento, incluso a esfuerzos reducidos, puede ocurrir la falla debido a la fatiga. Debido a su bajo punto de fusión, el aluminio no funciona bien a temperaturas altas. Además, las aleaciones de aluminio tienen dureza baja y, en consecuencia, su resistencia al desgaste es pobre. El aluminio muestra una buena respuesta a los mecanismos de endurecimiento. Es por eso que las aleaciones de aluminio pueden llegar a ser hasta 30 veces más resistentes que el aluminio puro [3].

El término de metal ligero (*light metal*) ha sido dado tradicionalmente al aluminio y al magnesio porque son usados frecuentemente para reducir el peso de componentes y estructuras. Por ejemplo, el aluminio tiene una densidad de aproximadamente una tercera parte que la del acero, que tiene una densidad de 7.8 gr/cm³ [13].

Entre las desventajas que presentan las aleaciones de aluminio de alta resistencia, como lo son los de la serie 2xxx y 7xxx son, un bajo módulo de elasticidad, mucha menor resistencia a las temperaturas y por lo tanto, un decremento considerable en su resistencia a la corrosión [12].

El aluminio es también uno de los metales menos nobles debido a su gran afinidad con el oxígeno, por lo cual a veces se utiliza como agente reductor.

Sin embargo, solo las aleaciones de aluminio que se han utilizado en la industria aeroespacial son las aleaciones trabajadas de la serie 2xxx, 6xxx y 7xxx, esto debido a la alta resistencia que desempeñan, es por eso que la principal aplicación de dichas aleaciones es formando parte del fuselaje de la nave [33].

3.4 ALEACIONES DE ALUMINIO

Es conveniente dividir las aleaciones de aluminio entre las dos mayores categorías, las vaciadas directamente a piezas o en lingotes; y las trabajadas, las cuales corresponden al 85% de las aleaciones aproximadamente, a las cuales se les da forma mediante deformación plástica. La diferencia entre las dos categorías se basa en el mecanismo primario para el desarrollo de las propiedades de la aleación [3, 10, 11].

Las aleaciones trabajadas, o aleaciones para forja, tienen composiciones y microestructuras significativamente distintas a las aleaciones para fundición, lo que refleja los diferentes requerimientos del proceso de manufactura. Dentro de cada grupo podemos dividir las aleaciones en dos subgrupos: las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente [3].

En este proyecto trabajaremos con aleaciones obtenidas por extrusión, lo cual es un proceso de compresión en el cual el metal es forzado a fluir a través de un dado para que tome la forma de la abertura de éste en su sección transversal [29].

Tipos de operaciones de extrusión:

- a) Extrusión directa: es en la que un tocho de metal se carga en un recipiente y una herramienta llama pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas de un dado al extremo opuesto del recipiente.
- b) Extrusión indirecta: es aquella en la que el dado está montado sobre el pisón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente, el metal es forzado a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pisón

3.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

La ANSI asigna cada aleación trabajada en un número de cuatro dígitos. El primero de ellos se refiere al principal elemento de aleación. Basados en esto existen los siguientes grupos de aleaciones:

1xxx: Aluminio puro.	<ul style="list-style-type: none"> - Propensa a endurecimiento por deformación y a soldaduras. - Excepcionalmente alta maleabilidad, resistencia a la corrosión y gran conductor de electricidad. - Resistencia a la tensión aproximada entre 10 y 27 ksi.
2xxx: Aleaciones Al-Cu.	<ul style="list-style-type: none"> - Tratable térmicamente. - Alta resistencia, a temperatura elevada y temperatura ambiente. - Resistencia a la tensión aproximada de 27 a 62 ksi. - Algunas aleaciones son soldables y posee baja resistencia a la corrosión.
3xxx: Aleaciones Al-Mn.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta maleabilidad y resistencia a la corrosión pero no muy buena resistencia. - Resistencia a la tensión aproximada de 16 a 41 ksi. - Propensa a endurecimiento por deformación.
4xxx: Aleaciones Al-Si.	<ul style="list-style-type: none"> - Algunas aleaciones son tratables térmicamente. - Resistencia de nivel medio. - Resistencia a la tensión aproximada de 25 a 55 ksi. - Presenta facilidad para soldarse.
5xxx: Aleaciones Al-Mg.	<ul style="list-style-type: none"> - Propensa a endurecimiento por deformación. - Excelente resistencia a la corrosión, soldabilidad y resistencia moderada. - Resistencia a la tensión aproximada de 18 a 55 ksi.
6xxx: Aleaciones Al-Mg-Si.	<ul style="list-style-type: none"> - Propensa a tratamientos térmicos. - Alta resistencia a la corrosión, excelente facilidad para extrusión, resistencia moderada. - Resistencia a la tensión aproximada entre 18 a 58 ksi. - Presenta facilidad para soldarse.
7xxx: Aleaciones Al-Zn.	<ul style="list-style-type: none"> - Tratable térmicamente. - Presenta muy alta resistencia. - Resistencia a la tensión aproximada entre 32 y 88 ksi. - Soldable mecánicamente.
8xxx: Aleaciones Al-Otros elementos	<ul style="list-style-type: none"> - Tratable térmicamente. - Alta conductividad resistencia y dureza. - Resistencia a la tensión aproximada entre 17 y 60 ksi. - Comúnmente aleada con Fe, Ni y Li.

Tabla 3.1 Atributos de las aleaciones trabajadas de aluminio [12].

El tercer y cuarto dígito son significativos de la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, por ejemplo la 1150 significa una pureza del aluminio de 99.50% [10].

En las series del 2xxx al 8xxx, el tercer y cuarto dígito representan el número consecutivo de la aleación, por ejemplo las aleaciones 6060 y 6061 son diferentes entre sí. El segundo dígito en la designación indica la modificación en la aleación, si es cero significa que es una aleación original, si es entre el 1 y el 9 indica modificaciones menores a la primera [10].

3.4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

El grado de endurecimiento queda definido mediante la designación de temple T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación. Otras designaciones indican si la aleación esta recocida (O), tratada por solución (W) o utilizada tal y como fue fabricada (F). Los números que siguen a la T o a la H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos del procesamiento de la aleación [3].

La designación para los tratamientos más comunes y su secuencia de operación usada para producir estos tratamientos se muestra a continuación.

<i>F - Tal y como fue fabricada (trabajo en caliente, forjada, fundida, etc.)</i>
<i>O - Recocida (en el estado más blando posible)</i>
<i>H - Trabajada en frío</i>
<i>H1x – Solo trabajada en frío (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y de endurecimiento)</i>
<i>H2x – Trabajada en frío y parcialmente recocido.</i>
<i>H3x – Trabajada en frío y estabilizado a una temperatura baja para evitar endurecimiento por envejecimiento en la estructura</i>
<i>W - Tratada por solución</i>

<i>T - Endurecida por envejecimiento</i>
<i>T1 – Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida naturalmente.</i>
<i>T2 – Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente.</i>
<i>T3 – Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida naturalmente.</i>
<i>T4 – Tratada por solución y envejecida naturalmente.</i>
<i>T5 – Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.</i>
<i>T6 – Tratada por solución y envejecida artificialmente.</i>
<i>T7 – Tratada por solución y estabilizada por sobre-envejecimiento.</i>
<i>T8 – Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.</i>
<i>T9 – Tratada por solución envejecida artificialmente y trabajada en frío.</i>
<i>T10 – Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida artificialmente.</i>

Tabla 3.2 Designaciones de temple para aleaciones de aluminio [3].

Las aleaciones extruidas son producidas forzando la entrada del metal sólido a través de una apertura, la cual designa la forma de la pieza, diseños que son simétricos alrededor de un eje son especialmente adaptables para la producción de una forma extruida [11].

Con la tecnología más reciente, también es posible realizar extrusiones con configuraciones más complejas y asimétricas. Las extrusiones de precisión despliegan un control dimensional excepcional, además de un buen acabado superficial. La mayoría de las dimensiones no requieren ser maquinadas, la tolerancia de la extrusión permite completarse de manera adecuada con cortes o perforaciones simples [11].

3.5 INCREMENTO DE LA RESISTENCIA POR TRATAMIENTO TERMICO

El Tratamiento térmico para incrementar la resistencia en aleaciones de aluminio consiste en tres pasos:

- 1) Tratamiento de solubilización: Disolución de materiales solubles.
- 2) Enfriamiento rápido: Obtención de una solución sólida sobresaturada.
- 3) Endurecimiento por envejecimiento: Precipitación de fases metaestables a partir de la solución sobresaturada a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a temperaturas superiores a la temperatura ambiente (envejecimiento artificial o tratamiento de precipitación) [31].

3.5.1 TRATAMIENTO DE SOLUBILIZADO

Para tomar ventaja de una reacción de endurecimiento por precipitación es necesario producir una solución sólida. El proceso por el cual esto se lleva a cabo se llama tratamiento de solubilizado y su objetivo es llevar a solución las cantidades máximas disponibles de los elementos aleantes que permitan incrementar la dureza en la aleación. El proceso consiste en calentar la aleación a una temperatura lo suficientemente alta y por un tiempo determinado para darle una homogeneidad a la solución sólida.

La temperatura comercial nominal de un tratamiento de solubilizado, está determinada por los límites de composición de la aleación y una permitida variación de temperatura no intencional. Aunque los intervalos normalmente listados permitan variaciones de $\pm 6^{\circ}\text{C}$ de la temperatura nominal, algunas aleaciones altamente aleadas, de dureza controlada o alta resistencia, requieren que la temperatura sea controlada dentro de límites más estrictos.

El tiempo requerido a la temperatura del tratamiento de solubilizado para un satisfactorio grado de solución de los elementos no disueltos, o de los constituyentes de la fase precipitada para lograr una buena homogeneidad es función de la microestructura previa al tratamiento térmico. Este tiempo puede variar desde menos de un minuto para hojas delgadas hasta 20 horas para fundiciones en grandes moldes de arena o yeso [31].

3.5.2 ENFRIAMIENTO RÁPIDO

El enfriamiento rápido es en muchas ocasiones el paso de operación mas crítico. El objetivo del enfriamiento es preservar la solución sólida formada a la temperatura del tratamiento de solubilizado a través de una rápida caída de temperatura, usualmente cerca de la temperatura ambiente. Esto no solo aplica a átomos del soluto retenidos, sino también a cierto número mínimo de sitios vacantes en la red que ayudan a promover la difusión a baja temperatura requerida para la formación de zonas y precipitados. Los átomos que precipitan en cualquier borde de grano, dispersos u otras partículas que migran tal como las vacancias con extrema rapidez a regiones desordenadas, son irrecuperablemente perdidos para propósitos prácticos y fracasan en el reforzamiento de la aleación.

En muchos casos para evitar aquellos tipos de precipitados que son perjudiciales para las propiedades mecánicas o la resistencia a la corrosión, la solución sólida formada durante el tratamiento de solubilizado debe ser enfriada muy rápidamente (sin interrupción) para producir una solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente, que es la óptima condición para el endurecimiento por precipitación [31].

3.5.3 ENDURECIMIENTO POR ENVEJECIMIENTO.

Después de un tratamiento de solubilizado y de un enfriamiento rápido el endurecimiento se hace a temperatura ambiente (envejecido natural) o con un tratamiento térmico de precipitación (envejecido artificial) el cual tiene un intervalo usualmente de 100 a 200°C. Las temperaturas y tiempos de envejecimiento son generalmente menos críticos que en la operación de solubilizado y dependen de cada aleación en particular.

En algunas aleaciones se presenta suficiente precipitación en unos pocos días a temperatura ambiente para permitir productos estables con propiedades que son adecuadas para muchas aplicaciones. Estas aleaciones a veces son tratadas térmicamente por precipitación para proveer un incremento en la resistencia y dureza en productos trabajados y fundidos. Otras aleaciones con baja reacción de precipitación a temperatura ambiente se les dan siempre un tratamiento térmico de precipitación antes de usarse.

En algunas aleaciones el trabajo en frío de materiales solubilizados y enfriados rápidamente hasta la temperatura ambiente incrementa grandemente su respuesta a tratamientos térmicos de precipitación posteriores. Se ha tomado ventaja de este fenómeno laminando o extruyendo para producir mejores propiedades mecánicas. De cualquier forma, si las elevadas propiedades son adecuadas para el diseño, el tratamiento de recocido puede ser evitado [31].

3.6 ALEACIONES DE ALUMINIO-MAGNESIO-SILICIO

Recientes investigaciones se han enfocado en las aleaciones de la serie 6xxx. A pesar de que las series 7xxx y 5xxx la superan en valores de resistencia mecánica, el requerimiento básico para la utilización de chapas en la industria automotriz precisamente es la alta deformabilidad de modo que los paneles puedan ser estampados y retengan e incluso aumenten su resistencia después de que se aplique el proceso de pintura por curado térmico (180°C durante 30 minutos), debido a los contenidos de magnesio y silicio que propician la precipitación de precursores de equilibrio metaestables, Mg_2Si [14].

Las aleaciones de Al-Mg-Si son un importante grupo de aleaciones, ampliamente usadas tanto en fundición como trabajadas. Las aleaciones son envejecidas y tratadas térmicamente rutinariamente en la condición T6 para obtener una resistencia adecuada. La respuesta al tratamiento de envejecido de las aleaciones es muy significativa, por lo tanto, el control de la precipitación

durante un tratamiento térmico es crítico para lograr un óptimo resultado en la aleación [10].

3.7 ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061

En cuanto a la aleación de aluminio 6061-T6, pertenece al grupo de aleaciones para forja tratables térmicamente. Estas aleaciones representan el 90% de los productos de extrusión producidos en occidente. Según el IAI (Instituto Internacional de Aluminio), la producción mundial de este elemento para el 2007 aumentó un 35% (con respecto a la producción del mes de febrero de 2006), alcanzando un total de 3,092 millones de toneladas. De acuerdo a cifras tomadas hasta el año 2001, el consumo mundial de productos de esta serie de aleaciones con respecto al total de productos de aluminio ha ido incrementándose [14].

Esta aleación contiene, en promedio, 0,6% Si, 1,0 % Mg, 0,30% Cu y 0,7% Fe. Es una aleación tratable térmicamente por ser de la serie 6XXX y tener como elementos principales el Mg y el Si. Según la experiencia y la práctica industrial, se logran los mejores desempeños y la máxima dureza con 0,75% si y 1% Mg. Esta aleación tiene mayor resistencia que la AA 6082 gracias a su contenido de cobre más alto y a su contenido de hierro que le garantizan un tamaño de grano más refinado.

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, gracias a su elevada resistencia a la tracción y a su excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar para la fabricación de soportes de culatas de fusil, en la industria del plástico para moldes prototipos ó para inyección, soplado e inyección y en general para porta-moldes y porta-troqueles, entre otros usos. Entre otras ventajas se encuentran su excelente conductividad, baja densidad, nula toxicidad y que no produce chispa y excelente resistencia a la corrosión.

En el estado 6061-T6, es decir, solubilizado y envejecido artificialmente, dicha aleación ofrece las siguientes ventajas: Resistencia superior a la de las aleaciones 6063, óptima conformación en frío y excelentes características para soldadura fuerte y al arco.

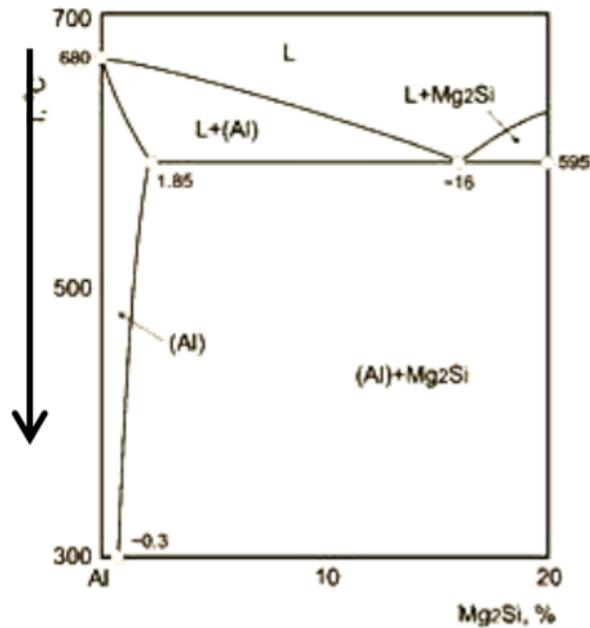


Figura 3.2 Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6061 [15].

La característica esencial de este diagrama reside en que el aluminio y el compuesto Mg_2Si forman un sistema cuasi-binario que separa el diagrama ternario en dos partes [15].

Eutético	Temperatura °C	Mg %	Si %
$Liq = \alpha(Al) + Mg_2Si + Si \dots$	556	4,97	14
$Liq = \alpha(Al) + Mg_2Si + \beta Al_3Mg_2 \dots$	450	33,5	0,2

Tabla 3.3 Eutéticos del sistema Al-Mg-Si [15].

Dada las características propias de esta aleación, no existe compuesto ternario alguno, sino una mezcla de Mg_2Si y Al_3Mg_2 . El compuesto Mg_2Si ,

inicialmente considerado como un compuesto iónico, según las investigaciones recientes, se comporta como un semiconductor. La solubilidad del compuesto Mg₂Si en aluminio varía de una manera muy importante, en función de la temperatura, por un lado y del exceso de magnesio, por otro [15].

Temperatura °C	Exceso de magnesio				
	0%	0,20%	0,40%	0,80%	1%
595	1,85				
535	1,2	1,15	0,97	0,67	0,55
500	1,05	0,85	0,69	0,45	0,36
400	0,53	0,35	0,2	0	0
300	0,3	0,16	0,02	0	0
200	0,25	0,05	0	0	0

Tabla 3.4 Solubilidad del Mg₂Si en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz [15].

Por el contrario, el silicio no tiene efecto apreciable sobre esta solubilidad. Sin embargo, en la práctica de la fundición de estas aleaciones, se adiciona un exceso de silicio, con el objeto de evitar todo exceso de magnesio y asegurar de esta manera la solubilidad de todo el Mg₂Si y garantizar las máximas propiedades mecánicas y físicas de la aleación. Si la aleación contiene una baja concentración de AA6061 aleantes de Mg o Si, entonces el compuesto puede ser disuelto durante el tratamiento térmico. Si el porcentaje está en exceso el precipitado se distinguirá por la presencia de una estructura Widmanstätten. Por esta razón, el ajuste de la composición es vital para asegurar que no existe exceso de Mg o Si [15].

Puesto que dicha aleación contiene 0,7 %Fe, aparecen precipitados ternarios del tipo Fe₃SiAl₁₂ (cúbica) o Fe₂Si₂Al₉. (mono-clínica) formadas de la reacción eutéctica. Los precipitados claros y oscuros son del tipo Fe₃SiAl₁₂. Con bajos contenidos de silicio casi siempre el hierro está presente como Al₃Fe. Con el aumento de contenido de silicio entonces aparece la fase Al-Fe-Si [15].

La microestructura de la aleación 6061 T6, se caracteriza por exhibir la fase alfa (más clara) con presencia de precipitados del tipo Fe_3SiAl_2 . [15]

3.8 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

La demanda de automóviles más livianos, de bajo consumo de combustible y mejor desempeño ha estimulado la investigación y desarrollo de aleaciones de aluminio de alta resistencia y deformabilidad, incluso se habla ya de una reducción de peso cercana al 47% con el reemplazo de láminas de acero por aleaciones de aluminio en la industria automotriz [14].

Aproximadamente el 25% del aluminio que se produce hoy en día se utiliza en la industria del transporte, otro 25% en la manufactura de latas para bebidas y otros empaques, 15% en la construcción, 15% en aplicaciones eléctricas y 20% en otras aplicaciones [3].

Más de la mitad de los automóviles producidos en Europa ya cuentan con radiadores de aluminio, que sustituye al cobre a un costo menor y con un provechoso ahorro en el peso. En realidad, todo costo mayor que se deba al precio inicial del aluminio comparado con las opciones más baratas puede compensarse con los ahorros de combustible que pueden llegar a un 10% [7].

Aproximadamente 200lb de aluminio fueron utilizadas en el automóvil promedio fabricado en Estados Unidos en 1996. El aluminio reacciona con el oxígeno, incluso a la temperatura ambiente, para producir una capa de óxido de aluminio extremadamente delgada que protege el metal subyacente contra muchos entornos corrosivos [3].

Las aleaciones de aluminio han dado resultados satisfactorios en particular en el mercado de los vehículos comerciales de carretera, donde se ha sustituido al acero y a la madera para la carrocería de los camiones de carga y

de furgones así como también los artículos estructurales del chasis, paneles y asientos en los carros de pasajeros y autobuses. Además, los ahorros en el peso dan por resultado una economía en el combustible y también útiles ahorros en el mantenimiento debido a que no hay corrosión ni pudrición de la madera [7].

Es común un mínimo de 10% de ahorro en el combustible; a veces es el doble para vehículos bien diseñados que empleen de manera apropiada las aleaciones de aluminio. En el caso de los motores, la alta conductividad del aluminio es muy valiosa para alcanzar una mayor eficiencia [7].

CAPÍTULO 4

MATERIALES COMPUESTOS

*La unión hace la fuerza.
Esopo*

4.1 DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

La definición de material compuesto ha sufrido sucesivas revisiones para poder incorporar nuevos productos y mantener diferencias con los existentes que no se consideran dentro de esta definición. Se suele definir el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfaces de separación entre ellos para formar un nuevo material [16].

Un material compuesto o “composite” está fabricado combinando dos o más materiales para obtener una combinación única de propiedades. En la definición se pueden incluir algunas aleaciones metálicas, co-polimeros, minerales y madera [17].

El material compuesto, tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material [16]. También se puede entender por composite, hablando de lo más utilizado en la actualidad, a aquel material compuesto formado por fibras rectas y largas situadas en el interior de una matriz, la cual mantiene a las fibras unidas y distribuye los esfuerzos.

Los materiales compuestos estructurales modernos, según los conceptos actuales difieren por ejemplo de los ladrillos de adobe o de hormigón reforzado de acero, en los que la paja o el acero proporcionan la resistencia a la compresión. En los materiales compuestos sintéticos modernos, tanto la fuerza tensora como la compresión las soporta el “refuerzo” fibroso. Aún con esta definición, los materiales compuestos no son algo nuevo; la fibra de vidrio y la baquelita reforzada con resina epóxica han sido utilizados durante años en una gran variedad de productos. Lo nuevo es la gama de materiales compuestos avanzados; materiales que utilizan fibras de gran rendimiento como el carbono, la aramida, o el vidrio “S” en matrices epóxicas y, cada vez más, poliamidas y materiales o termoplásticos exóticos.

Estos materiales superan las aleaciones metálicas en resistencia y rigidez, son mucho más livianas, tienen características superiores de fatiga y, lo que es muy importante, son prácticamente inmunes a la corrosión. Por consiguiente están sustituyendo a los materiales tradicionales en muchas aplicaciones en aeronaves, tanto civiles como militares.

Los materiales compuestos reforzados con fibras se diferencian del resto de los materiales debido a que los materiales que lo constituyen son diferentes desde un nivel molecular y son, por lo tanto, mecánicamente separables. De esta manera los materiales que constituyen este tipo de materiales compuestos trabajan juntos pero mantienen su forma original. Las propiedades finales del material compuesto son mejores que las de los materiales constituyentes por separado [17].

4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Existe tal variedad de materiales compuestos que resulta difícil realizar una clasificación de aceptación general sobre todo teniendo en cuenta que

cualquier clasificación si bien ayuda a resaltar aspectos comunes no es menos cierta que oculta otros [16].

Una primera clasificación es la que analiza el tipo de matriz, distinguiéndose los materiales compuestos de matriz metálica, cerámica, de carbono, orgánica o de plástico reforzado, los cuales son los más utilizados [34].

En lo que a los refuerzos se refiere, los hay de dos tipos: fibras, las cuales son elementos en forma de hilo en las que la relación $L/D > 100$, y cargas, el resto, utilizadas en elementos de poca responsabilidad estructural.

Tal y como se han resaltado, los materiales compuestos más utilizados son los de matriz orgánica y refuerzos en forma de fibras. En los siguientes apartados se analizan con más detalle ambos tipos de componentes [34].

La primera cuestión es acordar con respecto a qué factor se va a realizar la clasificación. Dado que la mayoría de los materiales compuestos fabricados lo han sido para mejorar propiedades mecánicas tales como resistencia, rigidez, tenacidad o propiedades a alta temperatura, parece razonable realizar la clasificación sobre el mecanismo que produce ésta mejor, el cual depende en gran medida de la geometría del refuerzo que se introduce dentro de un material base que se denomina matriz.

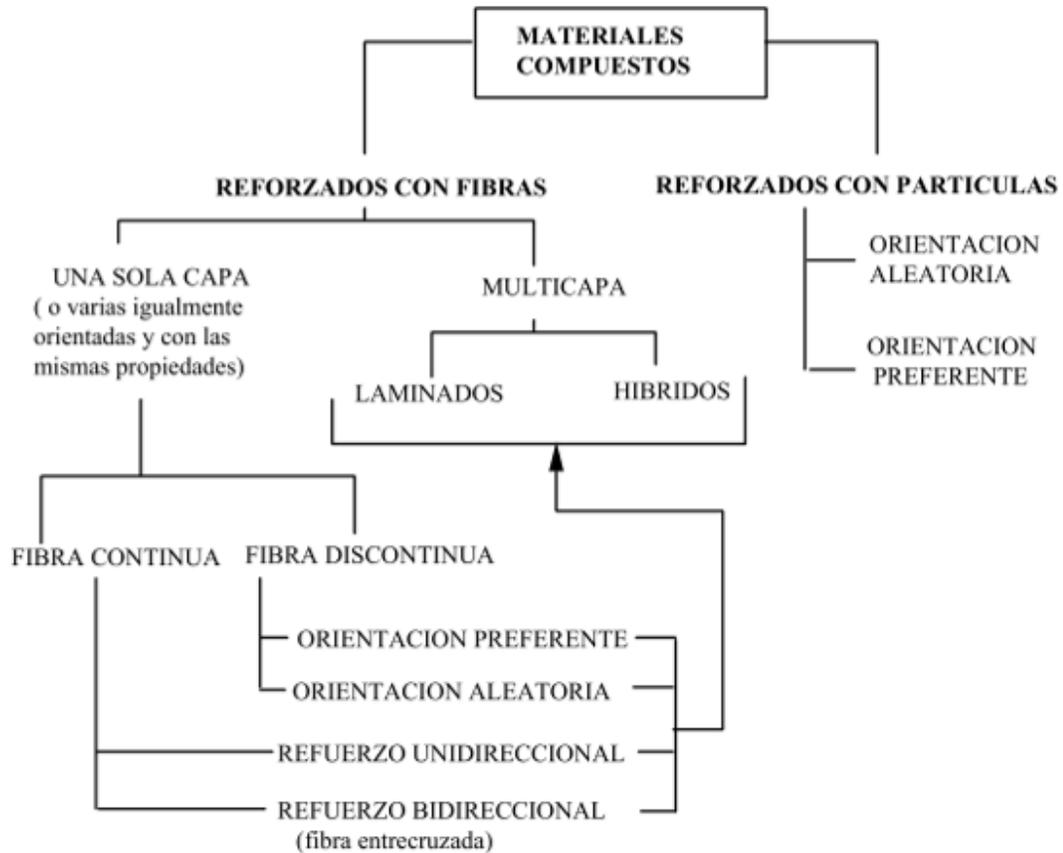


Figura 4.1 Clasificación de los materiales compuestos [16].

Con lo dicho anteriormente se obtiene esta clasificación, siendo preciso inicialmente realizar la distinción entre fibra y partícula.

Una fibra se distingue por que una dimensión, su longitud, es mucho mayor que las otras dos (características de la sección transversal). El resto de los refuerzos están agrupados como partículas pudiendo ser esféricos, cúbicos, laminares o irregulares.

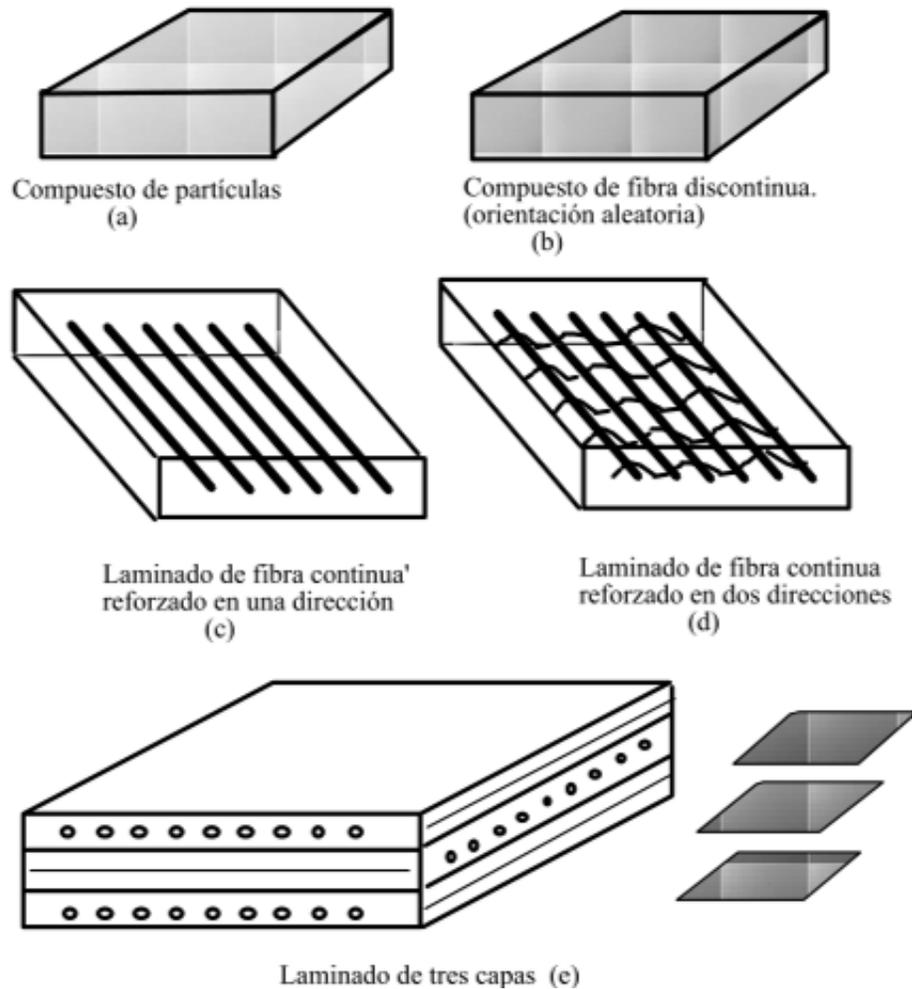


Figura 4.2 Configuración esquemática de varios materiales compuestos [16].

Existen distintos materiales que son altamente utilizados como refuerzos para formar un material compuesto de alta resistencia, entre los más conocidos y más utilizados debido a sus propiedades tanto físicas como mecánicas se encuentran los siguientes:

- Fibra de vidrio.
- Fibras de carbono y grafito.
- Fibras orgánicas.

- Boro.
- Carburo de silicio.
- Refuerzos especiales.
- Estructuras textiles.
- Partículas y "whiskers".

4.3 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

La mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras obtienen una mayor resistencia, una mejor resistencia a la fatiga, mejor módulo de Young y una mejor relación resistencia a peso al incorporar fibras resistentes, rígidas aunque frágiles, en un matriz más blanda y más dúctil [3].

Las fibras soportan la mayor parte de las cargas mientras que la matriz se responsabiliza de la tolerancia al daño y del comportamiento a fatiga. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando trabajan en la dirección de la fibra, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior aplicada.

Las fibras se sitúan en capas o láminas superpuestas obteniendo estructuras llamadas laminados. Las láminas nunca se superponen con la misma orientación. Se deberá estudiar a fondo la secuencia de apilación y orientación adecuada para cada caso. Ya que tiene más importancia incluso que las características físicas de las fibras y la matriz, pues es quien da las propiedades finales al laminado. Usando las mismas fibras y matriz y variando secuencia de apilado y orientación se pueden conseguir comportamientos radicalmente diferentes en resistencia, rigidez, tolerancia al daño, estabilidad dimensional o de laminación.

Las fibras de alto rendimiento son relativamente nuevas en el mundo de los materiales estructurales. Fueron descubiertas en los años '60 por ingenieros

electrónicos que trataban de encontrar la causa de misteriosos cortocircuitos en los primeros dispositivos basándose en semiconductores. La causa resulto ser finos filamentos de estaño que aparecían entre capas aislantes. Estos filamentos tenían una estructura cristalina pura muy regular y ofrecían una resistencia mecánica excepcional.

Dicha resistencia, de hecho, se aproximaba a los límites teóricos previstos según sus estructuras atómicas, algo imposible con las muestras ordinarias de metal laminado, fundido o extruido, debido a la amplia distribución de fallas en la estructura cristalina del material en bruto. También eran sumamente rígidos: en la jerga de los ingenieros eran materiales de “módulo elevado”. La elevada relación de rigidez a masa sigue siendo de los atractivos principales de las fibras utilizadas como materiales estructurales. Uno de los primeros materiales de fibra continua de módulo elevado que se utilizaron en aplicaciones estructurales fue el boro; las fibras de boro, no obstante, era difíciles de fabricar y trabajar, y lo que podía dar lugar a un desarrollo extraordinario de aplicaciones compuestas avanzadas, tuvo que esperar la aparición de las fibras de carbono y aramida a escala comercial principios de los '70.

Hoy en día, debido a su comparativa facilidad y economía de fabricación, las fibras de carbono y aramida son los elementos preferidos para el diseño y fabricación de estructuras compuestas perfeccionadas.

Las fibras a base de carbono se producen hilando fibras de un “precursor” sintético, emparentado con el rayón. Llamado poliacrilonitrilo (PAN) que se calienta y extiende en una atmósfera sin oxígeno para convertir las cadenas de carbono/hidrógeno/oxígeno del material original en moléculas de carbono puro orientadas en alta proporción. La aramida, un filamento orgánico proveniente de los hidrocarburos, se utilizan en estructuras compuestas, como en las fibras de “Kevlar” o en el “Nomex”, de papel y estructura alveolar (Tanto “Kevlar” como “Nomex” son marcas registradas de Dupont). Los materiales laminados de

carbono y resina epoxídica tienen resistencia a la tracción que sobrepasan las de la mayoría de las aleaciones de acero utilizadas en las aeronaves.

Su rigidez se sitúa entre la del acero y la del aluminio. La fibra de aramida tiene aproximadamente la misma resistencia a la tracción que las fibras comunes a base de carbono, una rigidez ligeramente inferior y una resistencia de compresión netamente inferior, pero es excepcionalmente fuerte; es el material que se fabrican los chalecos antibalas y su extraordinaria resistencia a la fractura se puede utilizar perfectamente en los materiales laminados. Cada uno de estos materiales sirve para una aplicación especial. A veces las mezclas de fibra de carbono y aramida (o de carbono y vidrio) se utilizan combinadas en un tejido único o pliegues alternativos de material laminados.

Las fibras más utilizadas debido a sus propiedades tanto físicas como mecánicas son las fibras de carbono, vidrio, boro (en menor medida) y las orgánicas (registradas como Kevlar) [16].

4.3.1 COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO

El carbono es un material en fibra de alto desempeño, el cual es el más utilizado para reforzar a los compuestos de matriz polimérica. Las principales razones de utilizar carbono como refuerzo son las siguientes:

- Las fibras de carbono tienen el más alto módulo y resistencia específica de todos los materiales de refuerzo que se utilizan en la actualidad.
- Estas fibras de carbono retienen su alto módulo de tensión y su alta resistencia aun cuando son expuestas a altas temperaturas.
- A temperatura ambiente, las fibras de carbono no se ven afectadas por la humedad, además de resistir una gran variedad de solventes, ácidos y bases.

- Estas fibras muestran una gran diversidad de características tanto mecánicas como físicas, permitiendo a los materiales compuestos incorporar estas fibras para obtener propiedades ingenieriles adecuadas.
- El procesamiento tanto de las fibras como de compuesto en sí, han logrado ser efectivamente costeables [1].

Las fibras de carbono tienen un diámetro de 7 a 8 μm y sus propiedades dependen del grado de perfección de la orientación de los planos de las capas de grafito que deben estar orientadas paralelamente al eje de la fibra. Existen varios procedimientos de grafitización que se realizan a una cierta temperatura que influye en las características de resistencia y rigidez de las fibras [16].

Las fibras de carbono son frágiles y muestran una recuperación elástica del 100% cuando se someten a esfuerzos inferiores a los de rotura. Lógicamente las propiedades transversales de las fibras son muy inferiores a las longitudinales. Uno de los mayores problemas de las fibras de carbono es la variabilidad de sus propiedades, condicionadas en gran medida por su efecto longitud ya que al aumentar ésta aumenta también la posibilidad de existencia de un defecto [16].

4.3.2 COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO

Fiberglass, como se conoce comúnmente, es simplemente un material compuesto que consiste en fibras de vidrio, tanto continuas como discontinuas, contenidas en una matriz polimérica; es el tipo de material compuesto fabricado en mayores cantidades. La composición del vidrio es comúnmente diseñado con fibras, las cuales normalmente tienen dimensiones de entre 3 y 20 μm . El vidrio es conocido como un material de refuerzo mediante fibras por las siguientes razones:

- Es fácil de obtener fibras de alta resistencia desde su estado de fundición.
- Puede ser fabricado en estado de plástico reforzado con vidrio económicamente usando una amplia variedad de técnicas de manufactura de materiales compuestos.
- Como una fibra es relativamente fuerte y resistente, cuando ésta se une a la matriz polimérica, ésta produce un compuesto de alta resistencia específica.
- Cuando se une con varios polímeros, se vuelve inerte químicamente, lo cual permite al compuesto ser utilizado en ambientes altamente corrosivos.

Las características superficiales de las fibras de vidrio son extremadamente importantes debido a que la más mínima falla puede deteriorar las propiedades mecánicas de la misma. Las superficies de vidrio que deben estar expuestas a una atmosfera normal por cortos periodos de tiempo generalmente tienen una superficie debilitada en la capa que interfiere con el linaje a la matriz [1].

Se han utilizado muchas combinaciones de vidrios minerales en las fibras de vidrio. Todas tienen como base sílice (SiO_2) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. El vidrio es usado por sus buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas y de desgaste [16].

El diámetro de las fibras de vidrio oscila entre 8 y 15 μm . A diferencia de las fibras de carbono, las fibras de vidrio son isotrópicas, consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio. La resistencia a la rotura del vidrio viene en gran medida condicionada por el daño superficial que pueden sufrir al rozar entre si durante su manipulación. Por ello se les suele aplicar una

capa protectora que adicionalmente puede generar una unión química entre la superficie del vidrio y la matriz, creando una interfaz de alta resistencia [16].

Propiedades	Unidades	Carbono Base PAN Tipo I	Carbono Base PAN Tipo II	Vidrio E	Kevlar 49 Poliamida
Diámetro	$\mu\text{ m}$	7,0-9,7	7,6-8,6	8-14	11.9
Densidad	10^3 kgm^{-3}	1.95	1.75	2.56	1.45
Módulo de Young E_{11}	GPa	390	250	76	125
Módulo de Young E_{22}	GPa	12	20	76	
Resistencia a tracción	GPa	2.2	2.7	1.4-2.5 (típica) 3.5 (estirada recientemente)	2.8-3.6
Alargamiento de rotura	%	0,5	1.0	1.8 - 3.2	2.2 - 2.8
Coefficiente de dilatación térmica (0 a 100 ° C)	10^{-6} C^{-1}	-0.5 a -1.2 (paralelo) 7-12 (radial)	-0.1 a -0.5 (paralelo) 7-12 (radial)	4.9	-2 (paralelo) 59 (radial)
Conductividad térmica (paralela al eje de la fibra)	$\text{W m}^{-1} \text{ C}^{-1}$	105	24	1.04	0.04

Tabla 4.1 Propiedades de las fibras de carbono, vidrio y Kevlar a 20°C [16].

4.4 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LAS FIBRAS.

Las características mecánicas de un compuesto reforzado con fibras dependen no solo de las propiedades de la fibra, sino también del ángulo al cual se transmite la carga aplicada a las fibras por la matriz. Aplicando un esfuerzo, la unión fibra-matriz cesa donde la fibra termina, en otras palabras, no existe transmisión de carga de la matriz en cada extremidad de la fibra [1].

Existe una longitud crítica de las fibras necesaria para obtener una resistencia y rigidez óptimas en el material compuesto. Ésta longitud crítica (l_c) depende del diámetro de la fibra (d) y de su esfuerzo último (σ^*), además del esfuerzo cortante de la unión fibra-matriz (τ_c).

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2 \tau_c} \quad (3)$$

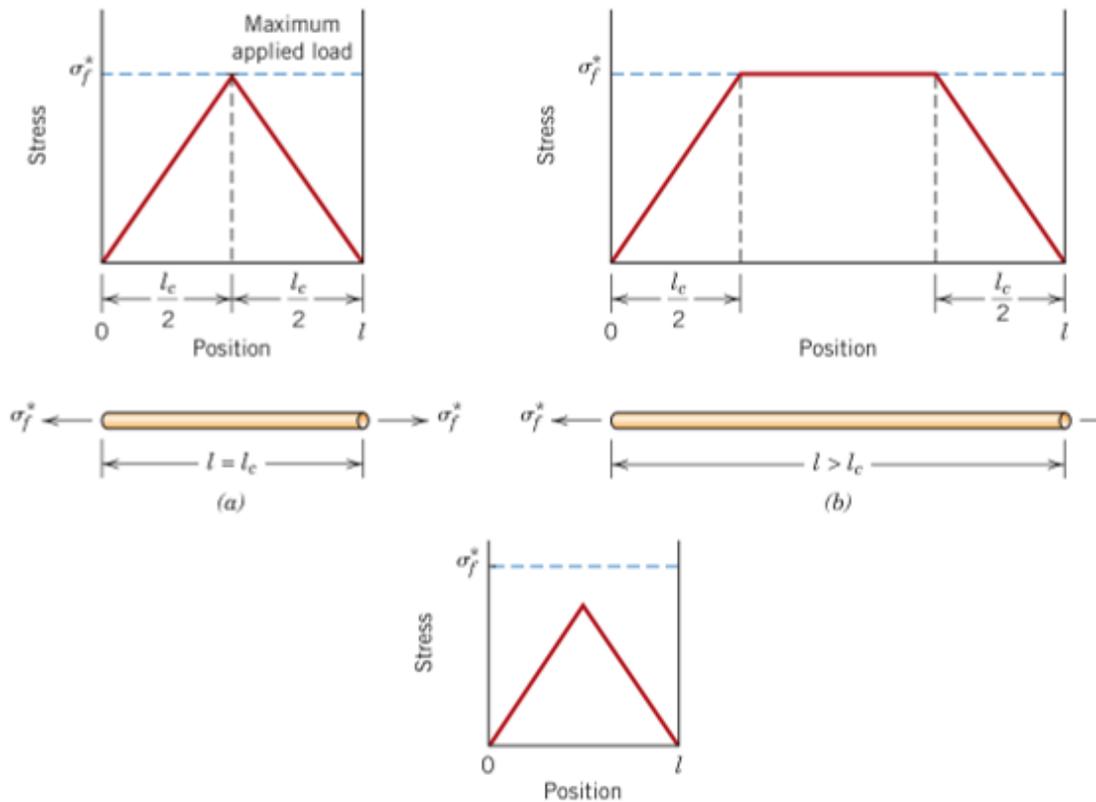


Figura 4.3 Perfiles de posición de estrés cuando la longitud de las fibras les igual (a) mayor (b) y menor (c) a la longitud crítica en un compuesto reforzado por fibras que está expuesto a un esfuerzo a tensión igual a la resistencia de la fibra a tensión [1].

4.5 MATRICES

Los materiales compuestos, como ya se ha discutido, están hechos de fibras como refuerzo y de distintos materiales que funcionan como matriz. La matriz rodea las fibras y las protege contra ataques químicos y ataques ambientales. Para fibras que resisten cargas considerables la matriz debe tener menor módulo y mucha más elongación que el refuerzo [17].

La selección de la matriz es determinada en base a los requerimientos químicos, térmicos, ambientales, de flamabilidad, costo, desempeño y de manufactura. La matriz determina la temperatura de operación del compuesto así como los parámetros de manufactura a utilizar en su procesamiento [17].

Existen distintos materiales que son utilizados como matriz, entre ellos se encuentran los siguientes:

- Matrices poliméricas.
- Curado de termoestables.
- Resinas de poliéster.
- Resinas de viniléster.
- Epoxi.
- Poliamidas.
- Polibencimidazoles.
- Matrices fenólicas y de carbono.
- Matrices termoplásticas.
- Matrices metálicas.
- Matrices cerámicas.

Las materias primas más usadas como matrices en los materiales compuestos son las resinas epoxi y poliéster con gran variedad en sus propiedades mecánicas y químicas. Su propiedad más interesante, que les da nombre (termoestables), es su respuesta al calor ya que no se funden al calentarlas (a diferencia de los plásticos) si bien pierden propiedades de rigidez

a partir de una cierta temperatura por lo que este valor (hasta 300°C para las epoxi y 110°C para las de poliéster) representa una limitación real para su uso [16].

La matriz soporta las fibras y las mantiene en su posición correcta, transfiere la carga a las fibras fuertes, protege las fibras contra daños durante su manufactura y uso en el material compuesto. La matriz, por lo general, es la que aporta el control principal sobre las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas de un material compuesto [3].

<i>Propiedad</i>	<i>Unidades</i>	<i>Resinas Epoxi</i>	<i>Resinas Poliéster</i>
<i>Densidad</i>	<i>Mg m-3</i>	<i>1.1 - 1.4</i>	<i>1.2 - 1.5</i>
<i>Módulo de Young</i>	<i>Gpa</i>	<i>3 - 6</i>	<i>2 - 4.5</i>
<i>Coef. Poisson</i>		<i>0.38 - 0.4</i>	<i>0.37 - 0.39</i>
<i>Resist. Tracción</i>	<i>Mpa</i>	<i>35 - 100</i>	<i>40 - 90</i>
<i>Resist. Compresión</i>	<i>Mpa</i>	<i>100 - 200</i>	<i>90 - 250</i>
<i>Alarg. Rotura (tracción)</i>	<i>%</i>	<i>1 - 6</i>	<i>2</i>
<i>Conduct. Térmica</i>	<i>W m-1 °C-1</i>	<i>0.1</i>	<i>0.2</i>
<i>Coef. Dilatación</i>	<i>10-6 °C-1</i>	<i>60</i>	<i>100 - 200</i>
<i>Temp. distorsión</i>	<i>°C</i>	<i>50 - 300</i>	<i>50 - 110</i>
<i>Contracción Curado</i>	<i>%</i>	<i>1 - 2</i>	<i>4 - 8</i>
<i>Absor. de Agua (24h a 20°C)</i>	<i>%</i>	<i>0.1 - 0.4</i>	<i>0.1 - 0.3</i>

Tabla 4.2 Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster usadas en los materiales compuestos [16].

La resina epoxi es un sistema de resina muy versátil, permite un amplio rango de propiedades y opciones de procesamiento, esto exhibe una excelente adhesión a muchos materiales. Las resinas epoxi son las más utilizadas, ya que se utilizan tanto en la industria aeroespacial como en la industria deportiva. Existen diferentes grados de epoxis y entre ellos varia el desempeño dependiendo de la aplicación que se le dé, además de que pueden ser mezcladas con otro tipo de resinas epoxi para obtener el desempeño deseado [17].

Los materiales compuestos con base a resinas epoxi otorgan buen desempeño tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas, éstas resinas pueden operar de buena manera a temperaturas entre 200 y 250°F (93 y 121°C) y existen ciertas resinas epoxis que resisten hasta 400°F (204°C). Para altas temperaturas y altos desempeños de resinas epoxis el precio se incrementa pero ellas ofrecen una buena resistencia tanto química como a la corrosión [17].

La resina epoxi son generalmente frágiles, pero debido a la diversidad de sus aplicaciones se han desarrollado resinas que combinan las excelentes propiedades térmicas de las resinas termoestables y la tenacidad de las termoplásticas. Éstas resinas epoxis tenaces son fabricadas añadiendo termoplásticos a la resina bajo distintas patentes de procesos.

En cuanto a las resinas poliésteres son sistemas de bajo costo y ofrecen excelente resistencia a la corrosión. Las temperaturas de operación de las resinas poliéster son menores que las temperaturas de operación de las resinas epoxis. Las resinas poliésteres pueden ser tanto termoestables como termoplásticas, éstas resinas son utilizadas para aplicaciones comerciales, debido a que presentan cierta flexibilidad y su costo no es elevado en comparación con las epoxis, además de que es utilizada tanto para compuestos continuos como discontinuos [12, 17].

4.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Las ventajas de los compuestos de alto desempeño son muchos y muy variados, entre estos están su ligereza en peso, la posibilidad de añadir o disminuir capas para obtener una resistencia y rigidez optima para su determinado uso, su alta vida debido a su resistencia a la fatiga, así como su alta resistencia a la corrosión, con lo cual se reducen costos en reparaciones de sus partes y sus sujeciones [12].

En general, la desventaja más clara de los materiales compuestos es el precio. Las características de los materiales y de los procesos encarecen mucho el producto. Para ciertas aplicaciones, las excelentes propiedades mecánicas como la alta rigidez específica (E/r), la buena estabilidad dimensional, la tolerancia a alta temperaturas, la resistencia a la corrosión, la ligereza o una mayor resistencia a la fatiga que los materiales clásicos, compensan el precio.

Entre las propiedades que presentan los materiales compuestos de matriz polimérica se encuentran las siguientes:

- Propiedades mecánicas (estáticas y dinámicas).
- Fatiga.
- Temperatura de deformación bajo carga.
- Resistencia al impacto.
- Coeficientes de expansión térmica.
- Efectos medioambientales.
- Propiedades mecánicas a largo plazo (por degradación).
- Resistencia a la fractura.
- Tolerancia al daño.

4.7 FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA

Para elaborar piezas con materiales compuestos, deberá tomarse en cuenta cuidadosamente, la geometría y el material (tipo de fibras, tipo de matriz, secuencia de apilado y orientación). El cálculo es mucho más complicado que para materiales clásicos. Se deberá conocer a fondo el comportamiento mecánico de los materiales compuestos (según la orientación de las fibras) para aprovechar todo su rendimiento. Las fibras se pueden obtener como fibras secas o como pre impregnados (prepeg). La fabricación con preimpregnados es la que mejor desempeño ofrece. A pesar de que para su almacenamiento son necesarias temperaturas muy bajas y los ciclos de procesado son a alta temperatura y presión.

Las fibras de carbono se elaboran mediante la carbonización o pirolización de un filamento orgánico, que se puede estirar o hilar más fácilmente en tramos delgados y continuos. El filamento orgánico conocido como precursor, está hecho frecuentemente con rayón (un polímero celulósico), poliacrilonitrilo (PAN) o resina (diversos compuestos orgánicos aromáticos). Las altas temperaturas desintegran el polímero orgánico, expulsando todos los elementos, excepto el carbono. Conforme se incrementa la temperatura de carbonizado de 1000 a 3000°C, la resistencia a la tensión se reduce, mientras que el modulo de elasticidad se incrementa. El estirado de los filamentos de carbono en ciertos momentos específicos de la carbonización puede producir las orientaciones preferidas deseables en el filamento final [3].

La pultrusion o extrusión estirada se utiliza para formar un producto de forma simple con sección transversal uniforme, como formas redondas, rectangulares, tuberías, placas o láminas. Las fibras o las esteras son tiradas por carretes, pasadas a través de un baño de resina polimérica para su impregnación y unidas para producir una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado. El curado o fraguado de la resina se efectúa casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto en forma continua. El material

extruido puede conformarse subsecuentemente en formas un poco más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquíes [3].

4.8 ESTRUCTURAS SANDWICH

Las estructuras tipo sándwich o emparedado consisten en la unión de dos tipos de materiales, frágil y dúctil, esto para obtener un material con alta tenacidad. Estas estructuras utilizan frecuentemente materiales de bajo peso, como es en este caso la ductilidad y bajo peso del aluminio, el cual provee algo de resistencia, pero su principal aporte es la flexibilidad y resistencia al impacto, mientras que la resistencia y rigidez la provee el material compuesto, en este caso fibra de carbono, la cual aporta la resistencia y una relación excelente de resistencia-peso.

El sándwich de materiales compuestos son altamente utilizados en estructuras de peso reducido, debido a que los paneles de material compuesto tienen una muy alta rigidez y una alta resistencia específica a los esfuerzos en comparación a los paneles sólidos, esto le provee cierta flexibilidad, además de que los paneles del sándwich se encuentran colocados en lugares específicos donde se concentran las cargas [18].

Debido a que es una estructura con extremadamente bajo peso y se desempeña con gran resistencia y rigidez, además de una de las mejores relaciones fuerza-peso, las estructuras sándwich son altamente utilizadas tanto en el área aeroespacial como en aplicaciones comerciales [12].

4.9 MATERIALES COMPUESTOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

El acero es actualmente un material relativamente barato, que satisface requerimientos relacionados con: versatilidad, seguridad, robustez, etc. Sin

embargo, por el contrario cuenta con una seria desventaja: es un material pesado; esta característica tan solo, por ejemplo, restringe seriamente los esfuerzos en los que están envueltos actualmente los principales fabricantes de automóviles, para poder generar unidades verdaderamente eficientes. Por ello este material tan podría ser sustituido en poco tiempo en muchas de las partes de los automóviles actuales.

Estamos a punto de entrar en la transición de la edad de hierro a la edad de los materiales compuestos, en lo que a la industria automotriz se refiere. El motivo por el que todavía el acero domina la fabricación de automóviles, es la inercia tecnológica que ha generado la enorme inversión hecha a lo largo del tiempo en diseñar, mecanizar, maquinar, y terminar en este metal miles de tipos de vehículos. Actualmente en Europa, cada nuevo modelo requiere alrededor de mil ingenieros que trabajan a lo largo de un año en el diseño, y luego otro año en la fabricación, generando costos de muchos miles de millones de euros.

Recuperar tal inversión lleva varios años, y rentabilizarla obliga a realizar una enorme producción en serie que a veces se ve sorprendida por cambios rápidos e imprevistos en las preferencias de los mercados. Un proceso productivo tan difícil y complejo y que obliga a asumir tantos riesgos financieros, podría quedar anticuado en poco tiempo.

El peso total de un vehículo es un factor crítico que afecta a todas las fases de su diseño. Su disminución permitirá reducir la potencia requerida para su arrastre, aumentará la eficiencia del sistema motriz, disminuirá tanto la resistencia a la rodadura de los neumáticos como la energía usada en su aceleración, que se derrocha en su frenado. Un diseño ligero no debe sacrificar ni la robustez ni la seguridad de la estructura del vehículo, reemplazando la mayor parte de sus piezas de acero por otras construidas en nuevos materiales como son los compuestos poliméricos avanzados y los cerámicos.

Cuando se aligera el peso de ciertas partes de un automóvil, se genera un "efecto dominó" sobre el resto de las piezas del vehículo, que pueden ser mucho más ligeras, ya que al reducirse la carga o tensión que soportan, pueden ser aligeradas sin menoscabo de su funcionalidad. Pero lo más importante de todo es que esta fuerte reducción del peso total permite instalar un motor de menor potencia para conseguir el mismo desempeño. Además ciertos sistemas auxiliares como los servos acaban por ser innecesarios. La supresión de masa en piezas giratorias redundante en mayor suavidad de funcionamiento, y el aligeramiento de la estructura, del motor y de la suspensión aumenta la comodidad del vehículo. Un vehículo del tipo híbrido ultraligero puede obtener una reducción en el peso superior al 50% sin sacrificar funcionalidad.

Las piezas en compuestos poliméricos avanzados se diseñan y fabrican de una forma totalmente diferente al acero, ya que son más ligeras, rígidas y robustas, y además permiten el trenzado interior de fibras, formando una matriz-soporte plástica que distribuye uniformemente la tensión. Las fibras pueden ser seleccionadas y orientadas para conseguir las propiedades mecánicas requeridas. Con la fibra de carbono es posible conseguir una robustez similar a la del acero, pero con la mitad o una tercera parte del peso de este. Para muchos usos, otras fibras como la de vidrio y poliaramida, son tan buenas o mejores, y actualmente entre un 50 y un 85 por ciento más baratas. Los chasis de los vehículos híbridos ultraligeros usarán con toda probabilidad compuestos avanzados, formulados con carbono, aramida (Kevlar), o fibras similares, que pueden alcanzar para un mismo peso, mayor grado de firmeza y robustez que los compuestos reforzados de fibra de vidrio.

Son también importantes los compuestos de aluminio infiltrados de aire (aluminum matrix composites), usados en la fabricación de piezas ligeras de motores, los de matriz metálica, que incorporan fibras de carbono-silicio cerámicas insertadas en aluminio o titanio y que poseen características metálicas superiores a las del acero, sobre todo en su resistencia al aumento a la temperatura. La adición de estas fibras al aluminio incrementa su resistencia

al alargamiento tres veces. También se hacen partes de motores con compuestos formulados con poliamida y poliéster. En Europa se fabrican y comercializan actualmente compuestos de fibra de vidrio y resina poliéster, sobre todo en palas para aerogeneradores.

Pero las ventajas más importantes de los compuestos surgen en la fabricación de piezas individuales. Solo el 15 por ciento del valor final de una pieza típica de automóvil hecha en acero corresponde al costo del metal; el 85 por ciento restante se distribuye en costos de fundición, soldadura, mecanizado y acabado. Sin embargo, las piezas de compuestos y otros moldeados sintéticos surgen desde el molde ya terminadas y con la forma requerida. Además las unidades grandes y complejas pueden moldearse en una sola pieza, Los cortes podrán hacerse a tan solo un 1% de lo que ahora es normal, así como reducirse el tiempo de ensamblaje y espaciado a casi el 10 por ciento. Las piezas, además de más ligeras y fáciles de ensamblar, pueden ajustarse mucho más precisamente. El pintado podrá suprimirse en parte al colocarse ya las piezas coloreadas desde el molde. A menos que se reciclen, los compuestos, estos tienen una duración ilimitada, ya que no son susceptibles de abollarse, oxidarse o quebrarse. Con estos materiales será posible que los nuevos vehículos incorporen un cuerpo monocasco sin bastidor. Esta configuración proporciona una rigidez extrema en el automóvil que facilita la conducción, aumenta la seguridad y elimina vibraciones.

Los compuestos avanzados ofrecen un gran potencial debido a su alta reducción de masa (2 veces menos que el aluminio y 5 veces menos que el acero). Reducir la masa de un vehículo disminuye el consumo de combustible, lo hace más fácil de conducir, de acelerar y de frenar.

Muchos expertos en automoción han estimado que los monocascos de los automóviles fabricados en compuestos avanzados pueden aligerar el peso de la estructura de un vehículo en más de un 60%, en relación con su equivalente en acero. El equivalente en aluminio se espera que lo aligere en

torno a un 50%, y el acero optimizado en más de un 25%. Por ello, para alcanzar altas cotas de reducción de masa y economía de combustible, los compuestos avanzados parecen ser mucho más prometedores. Sus superiores propiedades mecánicas proporcionan grandes ahorros en tamaño y peso, permitiendo que los automóviles sean más espaciosos, seguros y ligeros.

Con los compuestos pueden fabricarse equipos con una inversión hasta diez veces menor. Esto es así porque las piezas de compuestos se forman en la forma deseada no con los variados y complejos procesos que requiere el acero (prensados a alta presión o temperatura, estampados, galvanizados o revestimientos, pintados, rectificados, etc.), sino con un simple y sencillo moldeado, que generalmente se suele revestir de resina epoxi. Algunos procesos de fabricación de compuestos deben hacerse bajo presión, aunque mucho menor que la requerida para el moldeado de metales. La estructura de un automóvil está compuesta por muchos cientos de partes que deben ser soldadas para formar un único conjunto. El estampado del metal no permite generar directamente piezas individuales con formas geoméricamente complejas. Sin embargo los compuestos harán posible construir la estructura completa del automóvil moldeada de una sola pieza en forma de monocasco, generando la robustez propia del "efecto cáscara", y ahorrando muchos procesos de subensamblaje.

Si bien las piezas hechas con compuestos se desgastan más rápidamente que las de acero, su fabricación más económica compensa sobradamente la menor duración. El costo total del maquinado por modelo está actualmente entre la mitad y una décima parte que el acero, debido a la reducción de número de piezas, y porque muchas de estas pueden ser desechables, y por tanto más baratas. La estereolitografía, (proceso tridimensional que convierte las figuras diseñadas en computadora directamente en objetos sólidos complejos) puede disminuir el tiempo de maquinado de piezas complejas.

Los compuestos anisotrópicos ofrecen gran flexibilidad en el diseño de vehículos. Las propiedades de este material permiten que se gradúe exactamente la carga a la que se puede someter una pieza, por lo que el diseñador puede maximizar las ventajas de estos todavía costosos materiales.

Los procesos de fabricación de piezas permiten ajustar mucho más sus tolerancias de lo que lo permite el acero, por lo que las costuras entre piezas pueden ser bastante más delgadas de lo que lo son en los automóviles actuales.

La estabilidad de los compuestos (que presentan una alta resistencia a la oxidación y la fatiga), su alta firmeza, menor vibración y menor generación de ruido, los hacen más confortables para los automóviles.

Correctamente diseñados, los compuestos avanzados pueden proveer un excelente comportamiento ante los impactos por alcance. Tienen mejores propiedades, incluida la favorable absorción de la energía del choque (alrededor de cinco veces más por kilogramo que la del acero), que los hacen ideales para aplicaciones de seguridad. Por ello, los fabricantes de automóviles consideran la posibilidad de incluirlos en sus automóviles de acero para hacerlos más seguros.

Las principales desventajas de los compuestos avanzados son el alto costo del material, lo poco familiarizado que está el sector del automóvil con ellos, y sobre todo el hecho que para conseguir bajos precios finales es necesario que el volumen de producción sea similar al del acero. El kilo de fibra de carbono es actualmente entre treinta y cuarenta veces más caro que el de acero, aunque el necesario aumento en la producción permitirá a los fabricantes bajarlo en principio a la mitad y posteriormente hasta una cuarta parte. Aunque el costo de un automóvil producido en masa con materiales compuestos es probablemente comparable más o menos al de un automóvil de acero, lo importante en el futuro inmediato no será el costo de adquisición inicial, sino los costos globales a lo largo de su vida útil (de combustible, mantenimiento y conservación).

La creencia de que los compuestos son materiales difícilmente reciclables es debida a los problemas que presenta en la actualidad el reciclado de los envases de plástico, fundamentalmente por ser poco rentable. El caso de los compuestos es diferente, ya que el costo de su materia prima es muy superior.

Los compuestos están siendo usados actualmente en la industria aeroespacial, y en embarcaciones de alto desempeño. Los automóviles son inevitablemente los siguientes.

4.10 ADHESIVOS

En la actualidad el uso de adhesivos industriales ha ido en aumento, en la industria casi todo lo que se crea tiene componentes o piezas que deben unirse, dichas uniones son generalmente mecánicas, y utilizan métodos como atornillamiento o soldadura [24].

Sin embargo, los ingenieros utilizan cada vez más la unión por adhesivos, dicha técnica es capaz de reemplazar o apoyar las uniones mecánicas convencionales debido a su gran cantidad de ventajas que ofrece, tales como:

- Reducir costos de ensamblaje.
- Mejorar el desempeño y durabilidad del producto.
- Aumentar la libertad de diseño.
- Disminuir operaciones de acabado [24, 25].

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTACIÓN

Todo mi dinero lo he invertido en experimentos para realizar nuevos descubrimientos que permitan a la humanidad vivir un poco mejor.
Nikola Tesla

Este capítulo presenta los materiales utilizados, los procesos que se llevaron a cabo, la preparación de las muestras, el equipo utilizado y la metodología experimental que se siguió para la realización de éste proyecto.

Las simulaciones que se muestran fueron realizadas por personal de la empresa Metalsa S.A. de C.V. utilizando distintos programas de diseño y simulación.

La experimentación se realizó en paralelo utilizando el laboratorio del postgrado de Ingeniería en Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León y las instalaciones del Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIIA) de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

5.1 MATERIAL

Para la realización de este proyecto se utilizaron diferentes tipos de materiales, se requería contar con un material que fuera ligero, soportara impactos, que fuera de bajo coste y con propiedades mecánicas adecuadas para

el propósito. Por ello se selecciono una aleación de aluminio. También se requirió de un material que proporcionara la alta resistencia mecánica aunque presente fragilidad para formar la estructura sándwich. Por ello se seleccionó entre los materiales compuestos a la fibra de carbono. Y por último, para lograr la unión de ambos materiales para formar la estructura se hizo uso de un adhesivo estructural.

5.1.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO.

En principio se estudiaron diferentes aleaciones de aluminio a utilizar en éste proyecto, tomando en cuenta tanto sus propiedades mecánicas como su costo de obtención en el mercado.

Las aleaciones de aluminio que se tomaron en cuenta para la investigación fueron aquellas con propiedades estructurales. Por lo tanto se tomaron en cuenta las aleaciones trabajadas base cobre y base magnesio-silicio lo que corresponde a aluminios de la serie 2xxx y 6xxx, respectivamente.

Se investigó y comparó los ensayos mecánicos de tensión simples en la literatura para determinar la aleación que se utilizaría. Las aleaciones fueron la 6061, la 6013 y la 2014 debido a que en la literatura poseían mejores propiedades mecánicas sin tener un costo tan elevado, además de que son aleaciones que se obtienen con relativa facilidad.

Las resistencias de las diferentes aleaciones son muy parecidas, tienen una resistencia media/alta por lo que se seleccionó para trabajar la aleación 6061, a pesar de que es la que menor resistencia tiene, el precio de obtención es mucho menor que las otras aleaciones por lo que la relación resistencia/precio era mayor con la aleación 6061.

Composición química de la Aleación de Aluminio 6061 (peso %)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otro	Total otros	Al
Max	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	Restante
Min	0.4		0.15		0.8	.04					

Tabla 5.1 Composición química de una aleación de aluminio 6061 [21].

La aleación de aluminio 6061 es base magnesio-silicio y llevándole a cabo un tratamiento térmico de solubilizado seguido por otro tratamiento térmico de envejecido artificial llamado T6, se incrementan sus propiedades mecánicas para un uso estructural [31].

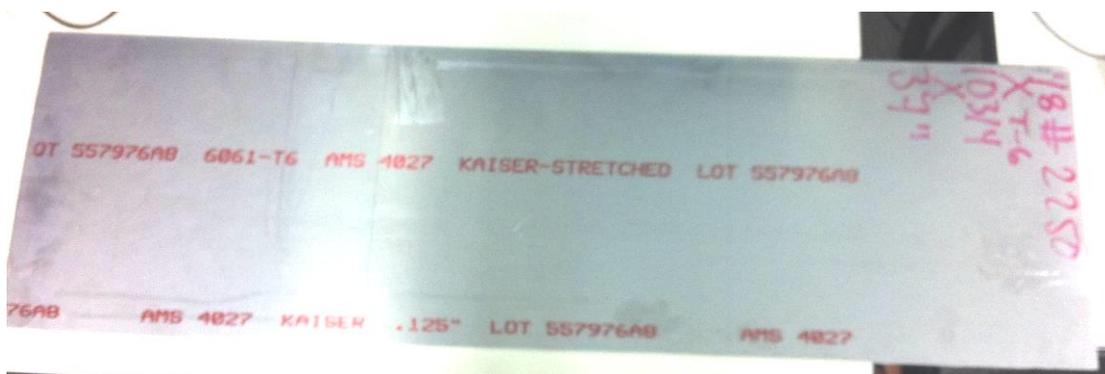


Figura 5.1 Placa de Aleación de Aluminio 6061 T6 de 1/8 de espesor.

Se obtuvo la aleación de aluminio 6061 T6 en dos diferentes espesores. La placa de la figura 5.1 tiene un espesor de 1/8 de pulgada y la Figura 5.2 tiene un espesor de 3/32 de pulgada.

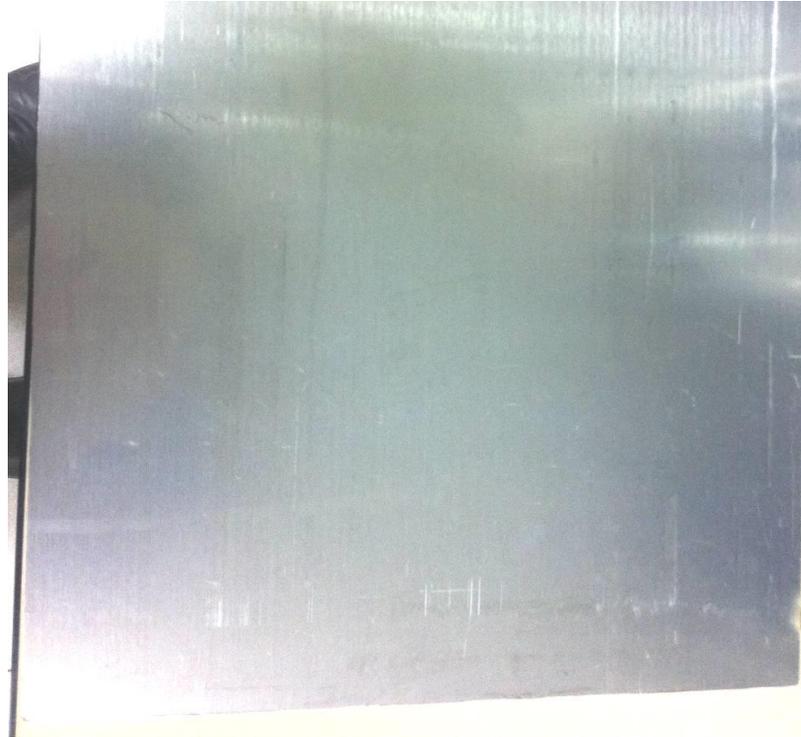


Figura 5.2 Placa de Aleación de Aluminio 6061 T6 de 3/32 de espesor.

Por el método de chorro de agua se realizaron los siguientes cortes en la placa de aleación de aluminio 6061 T6 para obtener las probetas para ensayos de tensión, adhesión y compresión con perforación, estas pruebas fueron necesarias después de las simulaciones realizadas por el personal de Metalsa S.A. de C.V. donde se visualizaron los puntos críticos del chasis a reforzar.

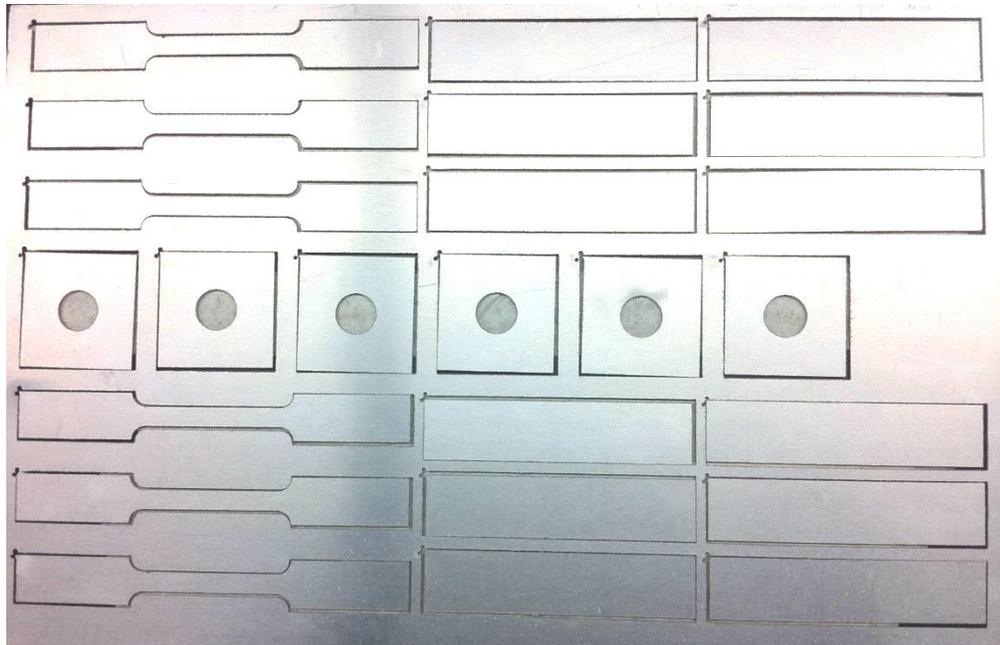


Figura 5.3 Probetas para ensayos de tensión, adhesión y compresión con perforación cortadas con agua en una placa de aleación de aluminio 6061 T6.

5.1.2 MATERIAL COMPUESTO.

El material compuesto forma la parte más importante en la formación de la estructura sándwich porque es la responsable de proporcionar la alta resistencia a dicha estructura. Por ello se determinó que el material adecuado para dicho propósito era la fibra de carbono.

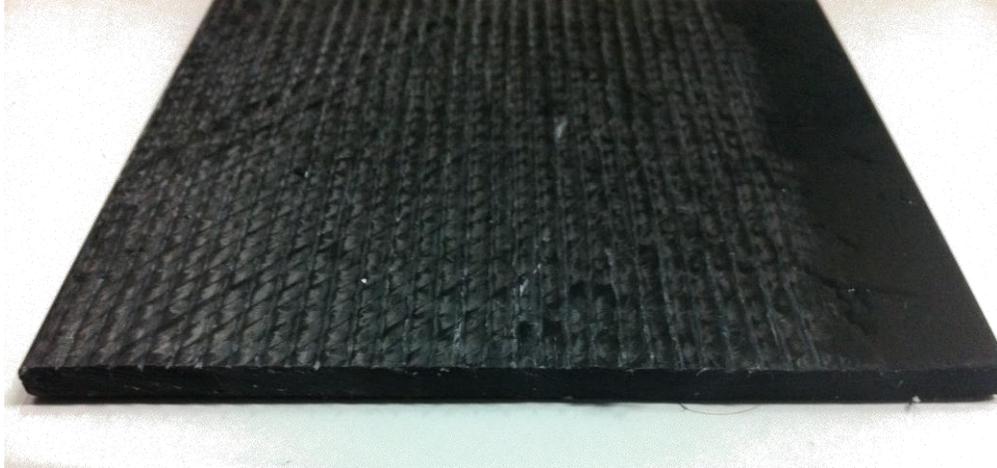


Figura 5.4 Perfil de material compuesto de Fibra de Carbono con resina epóxica obtenida por el método de pultrusión.

Se obtuvo la fibra de carbono pre-impregnada y fabricada por el método de pultrusión el cual permite obtener un perfil de la fibra de carbono con la resina epóxica, lo cual le proporciona rigidez y cierta flexibilidad al material compuesto. La fibra de carbono se obtuvo con dos distintas superficies, superficie de fibra de carbono en una y superficie de fibra de vidrio en la otra; esto para determinar tanto si la adhesión al sándwich varía entre las superficies distintas de material compuesto como para medir la variación de resistencia mecánica en los dos materiales compuestos.

Se realizaron los cortes iniciales en el material compuesto tanto con superficie de fibra de carbono como con fibra de vidrio para obtener las probetas, en ambos casos se empezó cortando con una sierra convencional para no afectar las fibras y no generar polvos que son muy finos y generan una nube contaminante y nociva para la salud si se llega a respirar cuando el corte se realiza a alta velocidad.



Figura 5.5 Corte de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio utilizando una segueta convencional.

Se realizaron también cortes mediante disco abrasivo, ambos con extractor de humos a baja velocidad de corte. Esto para conocer su dificultad de corte por este medio.



Figura 5.6 Corte de material compuesto de fibra de carbono mediante disco abrasivo.

El corte del material compuesto de fibra de carbono tanto con fibra de vidrio como con fibra de carbono en la superficie se corta fácilmente utilizando disco abrasivo, inclusive utilizando velocidades bajas de corte.



Figura 5.7 Pieza de material compuesto de fibra de carbono recién cortada.

De igual manera se le llevaron a cabo cortes al resto de material compuesto de fibra de carbono con ambas superficies para obtener probetas para realizarles ensayos de tensión de manera individual, ensayos de tensión en estructura sándwich, ensayo de compresión con perforaciones, así como el ensayo de adhesión junto con una probeta de aleación de aluminio.

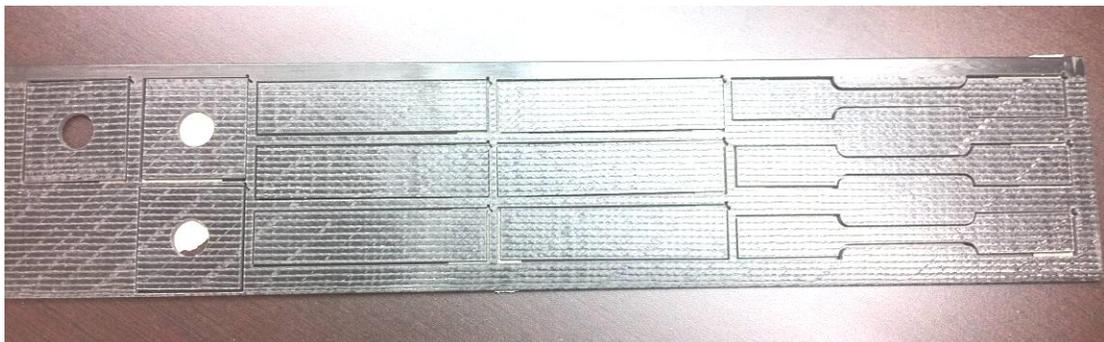


Figura 5.8 Cortes para probetas de tensión, adhesión y compresión con perforación en placa de material compuesto de fibra de carbono.

5.1.3 ADHESIVO

Para unir a la aleación de aluminio con el material compuesto se utilizó un adhesivo estructural llamado Araldite 2014 de la serie 2000+ de la marca comercial Huntsman



Figura 5.9 Adhesivo estructural Araldite 2014 de Huntsman.

El adhesivo “Araldite 2014”, es un adhesivo estructural con las siguientes características:

- Adhesivo de dos componentes (resina y endurecedor).
- Su temperatura de curado es temperatura ambiente o mayor.
- Pasta adhesiva tixotrópica, es decir, que su viscosidad varía con el tiempo.
- Posee alta resistencia al ambiente y a los ataques químicos.

Para utilizar de manera adecuada el adhesivo, es necesario llevar a cabo un pre-tratamiento de las superficies a adherir, esto para asegurar una óptima adhesión y obtener mejores resultados.

La fuerza y durabilidad de la unión depende altamente del tratamiento correcto de las superficies donde se colocara el adhesivo. Las superficies deben, al menos, ser limpiadas con un desengrasante, tal como la acetona; esto para remover toda grasa, aceite o polvo de la superficie.

Se debe evitar el uso de productos como gasolina, “thinner” u otro agente con bajo contenido de alcohol.

También se recomienda utilizar materiales abrasivos para dejar una superficie áspera para obtener una mejor adhesión.



Figura 5.10 Superficie de aluminio pre-tratada con lija Struers #80 y alcohol.

El adhesivo presenta mejores propiedades si el curado se realiza a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 7 días, esto a comparación del curado durante 24 horas a temperatura ambiente y acelerado a 80°C durante 30 minutos como se puede observar en la Figura 5.11.

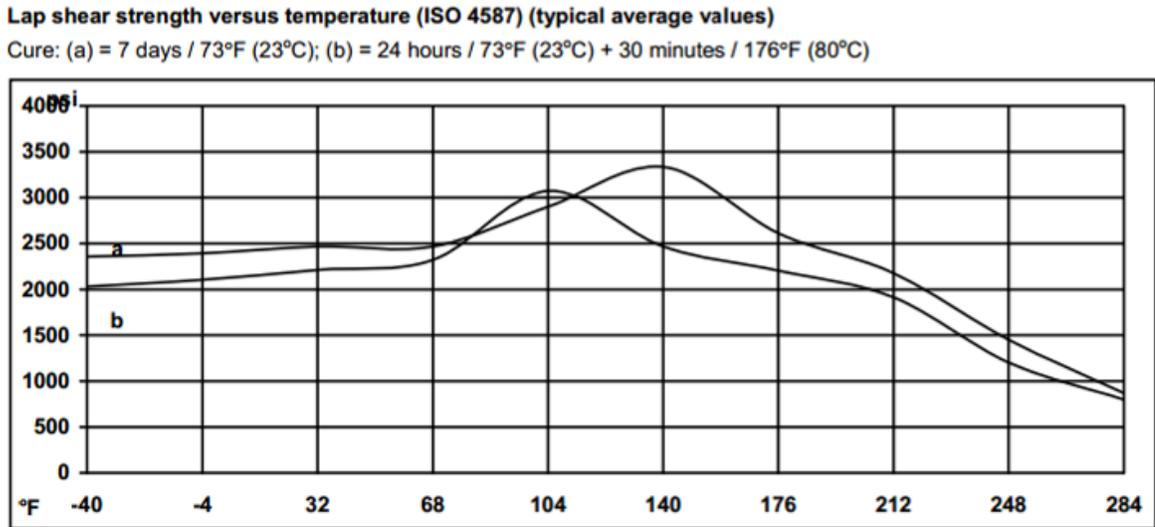


Figura 5.11 Resistencia típica de ensayo a traslape a diferentes tiempos de curado.

La mezcla resina-endurecedor se debe ser aplicada (manual o robóticamente) sobre las superficies a unir pre-tratadas y secas. El área mínima para poder medir resultados es una pulgada cuadrada.

Durante la aplicación del adhesivo sobre la superficie deseada, las superficies pueden deslizarse, pero se debe evitar separar las superficies para evitar burbujas en el adhesivo fresco, debido a que es un punto de nucleación de la grieta y por lo tanto no se tendrán los resultados esperados.

Se recomienda durante la aplicación usar un poco más de lo que parezca necesario, además de aplicar presión para que el adhesivo se distribuya de igual

manera por toda la superficie. Es recomendable que la presión se mantenga durante todo el tiempo de curado.

5.2 PREPARACIÓN METALGRÁFICA

Una pequeña sección de la aleación de aluminio 6061 T6 fue cortada con disco abrasivo mediante el uso de la máquina cortadora de precisión marca Struers, esto para obtener la probeta para el análisis metalográfico.

Se obtuvieron dos secciones de aleación de aluminio, una de la pieza antes de ser deformada por el ensayo de tensión, y otra después del ensayo de tensión. Esto para comparar la microestructura del aluminio 6061 T6 antes y después de la deformación.



Figura 5.12 Cortadora de precisión marca Struers modelo Discoton-60.

Después de cortada la probeta fue montada en baquelita sobre su cara transversal respecto a su dirección de laminación, utilizando una montadora Struers modelo CitoPress-10, calentando la resina a 180°C y manteniendo la temperatura durante 6 minutos aplicando una presión de 25 KN, posteriormente el tiempo de enfriamiento fue de 2 minutos.



Figura 5.13 Montadora marca Struers modelo CitoPress-10

Una vez que las muestras fueron montadas, se prosiguió con el desbaste o esmerilado y pulido de las mismas. Las muestras fueron tratadas en una pulidora automática Struers modelo TegraPol-25 mediante el uso del método Struers A, el cual corresponde a materiales dúctiles, tales como el aluminio.

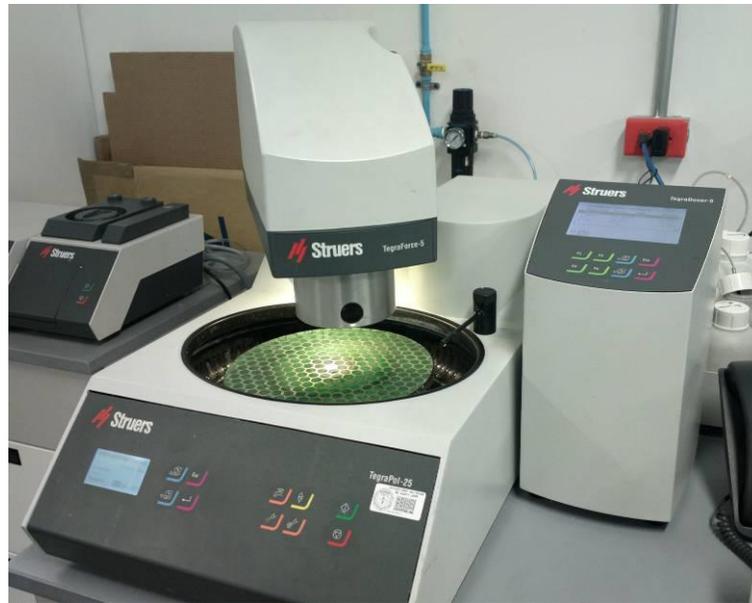


Figura 5.14 Pulidora automática marca Struers modelo TegraPol-25.

Los primeros pasos de la eliminación mecánica de material de una muestra se conoce con el nombre genérico de esmerilado. Un esmerilado apropiado elimina de la superficie de la muestra el material dañado o deformado, introduciendo mientras tanto solo un grado limitado de nuevas deformaciones. El objetivo consiste en conseguir una superficie plana, con unos daños mínimos, que puedan ser eliminados fácilmente durante el pulido posterior de la muestra, en el tiempo más corto posible. El esmerilado puede dividirse en dos procesos individuales: el esmerilado plano (PG) y el esmerilado fino (FG) [22].

 Paso	 PG	 FG
 Superficie	Papel de SiC	MD-Largo
 Abrasivo	SiC	Suspensión DP
 Grano/ Tamaño del grano	#320	9µm
 Lubricante	Agua	Verde / Azul
 [rpm]	300	150
 Fuerza [N]	150	180
 Tiempo [min]	Hasta conseguir superf. plana	5

Figura 5.15 Proceso de esmerilado según el método Struers A para materiales dúctiles [22].

Como el esmerilado, el pulido debe eliminar los daños provocados por las operaciones previas. Ello se consigue utilizando partículas de abrasivo cada vez más finas, en pasos sucesivos. El pulido puede dividirse en dos procesos diferentes: El pulido con diamante (DP) y el pulido con óxido (OP) [22].

La etapa de pulido del material se realiza bajo las siguientes condiciones hasta conseguir un acabado espejo en el material.

 Paso	 DP 1	 DP 1	 OP
 Superficie	MD-Dur	MD-Mol	MD-Nap o MD-Chem
 Abrasivo	Suspensión DP	Suspensión DP	OP-S o OP-U
 Tamaño del grano	6µm	3µm	-
 Lubricante	Verde / Azul	Rojo	-
 [rpm]	150	150	150
 Fuerza [N]	180	150	60
 Tiempo [min]	4	3	1

Figura 5.16 Proceso de pulido según el método Struers A para materiales dúctiles [22].

Teniendo las probetas en acabado espejo, se someten a un ataque químico, el cual revela la microestructura del espécimen para facilitar su análisis mediante microscopía óptica [28].

El ataque químico por inmersión consiste en exponer la pieza de aleación de aluminio con acabado espejo a una solución reactivo por contacto directo durante un tiempo determinado. El reactivo químico atacara la superficie de la aleación de aluminio revelando su microestructura [28].

Se utilizó el reactivo de Weck para el ataque químico por inmersión. Dicho reactivo tiene la siguiente composición.

Reactivo de Weck			
Compuesto	H ₂ O	KMnO ₄	NaOH
Cantidad	100mL	4g	1g

Tabla 5.2 Componentes del Reactivo de Weck [32].

5.3 CARACTERIZACIÓN POR MEDIO DE MICROSCOPIA ÓPTICA

Los estudios de microscopía proporcionan las características microestructurales, tales como son el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación, así como las inclusiones no metálicas y otras heterogeneidades.

Se analizaron los especímenes anteriormente mencionados de aleación de aluminio 6061 T6 por microscopía óptica con el objetivo de determinar las características del material. Los especímenes fueron observados y fotografiados a diferentes magnificaciones utilizando un microscopio óptico de platina invertida marca Axio modelo Observer Z1m.

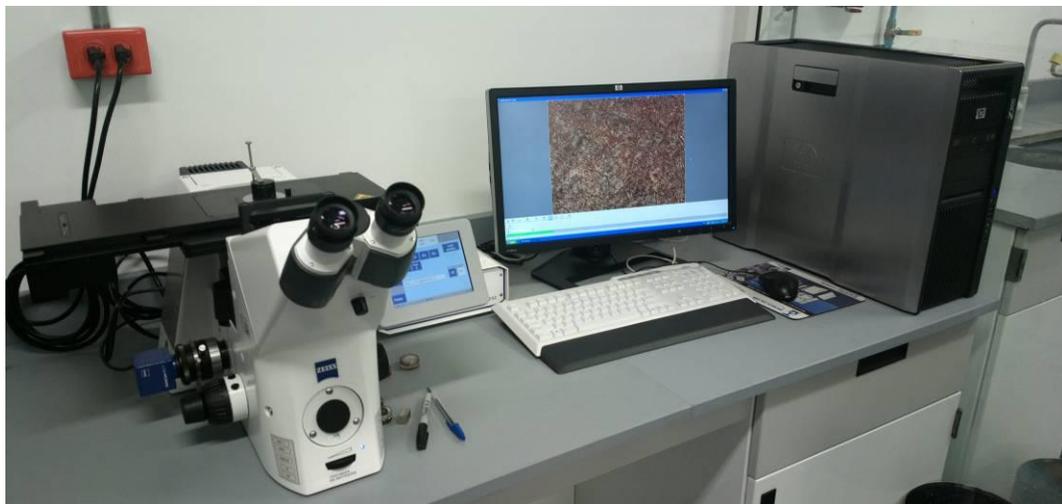


Figura 5.17 Microscopio Óptico de platina invertida marca Axio modelo Observer Z1m.

5.4 MICRODUREZA

El ensayo de dureza Vickers es un método para medir la dureza de los materiales mediante un indentador de diamante con forma de pirámide, el ángulo comprendido entre las caras opuestas de la pirámide es de 136°. La dureza Vickers se define como la carga dividida por la superficie de indentación, esta zona se calcula a partir de mediciones microscópicas de las longitudes de las diagonales de la impresión [23]. Esta técnica es considerada como ensayo de microdureza debido a la magnitud de la carga y al tamaño del indentador, se designa la dureza en unidades denominadas HV.

Para realizar este ensayo se necesita una cuidadosa preparación de la superficie de la muestra, para ello se requiere que las muestras sean montadas y pulidas hasta conseguir un acabado espejo (realizando la metodología mencionada en la sección 5.2).

La dureza Vickers de las piezas de aleación de aluminio 6061 T6 antes y después de la deformación fue determinada mediante un microdurómetro marca Shimadzu modelo HMV-2T en el cual se utiliza como indentador una pirámide de diamante y se aplica una carga de 2940mN por un tiempo de 5 segundos. El equipo utilizado para realizar el ensayo cuenta con un dispositivo que realiza las mediciones de las diagonales de las huellas del indentador, calculando automáticamente el valor de la dureza. Se realizaron un total de 10 indentaciones por muestra.

Ensayo de dureza Vickers		
AA 6061T6	Carga (mN)	t (s)
Antes de deformación	2940	5
Después de deformación		

Tabla 5.3 Cargas y tiempos aplicados en el ensayo de microdureza Vickers



Figura 5.18 Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.

5.5 CARACTERIZACION DEL MATERIAL COMPUESTO

Se llevo a cabo la caracterización de las placas reforzadas con fibras de carbón, con y sin fibra de vidrio, utilizando los siguientes equipos: estereoscopio, microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la orientación de las fibras.

Los equipos que se utilizaron fueron un Microscopio Electrónico de Barrido JSM-6510LV, un Microscopio Óptico de platina invertida Axio Observer Z1m (Figura 5.17) y un Estereoscopio motorizado Zeiss-Discovery V12.

Se obtuvieron dos diferentes placas, una identificada como CF (Carbon Fiber) y la otra como GF (Glass Fiber), sin embargo de acuerdo a los estudios

realizados ambas están elaboradas con fibras de carbón, solo que una cuenta solamente con fibras de carbón orientadas en dirección de la fabricación en su interior y en la superficie fibras igualmente de carbón orientadas a 45° principalmente. La segunda (GF) cuenta con fibras de carbón orientadas en dirección de la fabricación y en la superficie fibras de vidrio orientadas a 45° en ambos casos la sección superficial es de aproximadamente 1 mm de espesor lo que representa aproximadamente un 20% del espesor total de la placa.

5.6 ENSAYO DE TENSION

Las propiedades mecánicas de un material determinan el comportamiento de este durante la aplicación de alguna carga o fuerza, existen tres tipos de ensayos: tensión, compresión y cortante.

El ensayo de tensión permite obtener información de las propiedades mecánicas de un material, mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada en una probeta. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F , que se conoce como carga. También se mide la elongación del material en la probeta por la aplicación de la fuerza en la longitud calibrada [3].

Para determinar las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061 T6, como de la estructura sándwich de aleación de aluminio 6061 T6 reforzada con material compuesto de fibra de carbono con superficie tanto de vidrio como de carbono se realizaron ensayos de tensión uniaxiales, para ello se utilizó un máquina universal de pruebas marca Shimadzu modelo Autograph AgX de 300kN de capacidad. Se utilizaron probetas las cuales fueron cortadas con una máquina de corte con agua con dimensiones correspondientes a la Norma ASTM E8 con subsize.

ASTM E 8/E 8M - 08

Dimensions	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section (Note 8)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Figura 5.19 Norma ASTM E8 para ensayos de tensión [27].

Además se manejaron velocidades de cabezal de 10 mm/min a temperatura ambiente y con un factor de repetitividad de 3 en cada condición, para cada una de las pruebas realizadas para este estudio. Las velocidades de cabezal se determinaron en base a la experiencia, estudios previos y asesoría por parte del personal técnico.



Figura 5.20 Maquina Universal marca Shimadzu modelo Autograph AgX de 300kN.

Para tener un análisis más exacto de las dimensiones se utilizó un vernier digital marca Mitutoyo para registrar la longitud, el ancho y espesor de cada probeta.

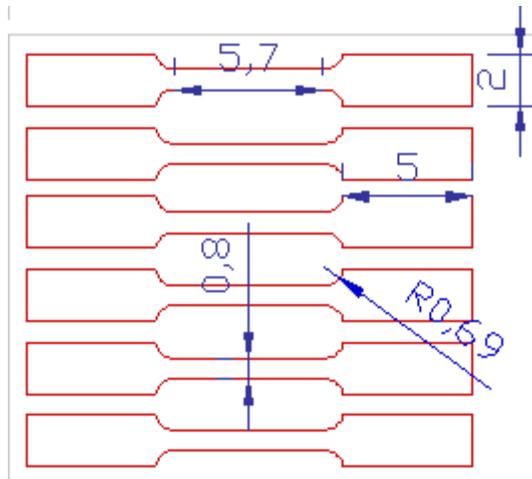


Figura 5.21 Dimensiones de probetas de tensión tanto para aluminio como para material compuesto.

5.6.1 ENSAYO DE ANGULO

Antes de realizar cualquier corte en el material compuesto, se propuso realizar un ensayo del ángulo, el cual consiste en obtener probetas de tensión cortadas a 0° y 45° con respecto a la dirección de laminación del material para el material compuesto con superficie de fibra de carbono y con superficie de fibra de vidrio (ver Figura 5.7) mediante una máquina de corte con agua. Esto debido a que el acabado de la superficie de corte es muy satisfactorio tanto con disco abrasivo como con agua, pero la precisión del corte con agua es muy superior. Se cortaron 2 piezas por sección de lámina y las dimensiones se tomaron como marca el estándar subsized de 100 x 10 mm.

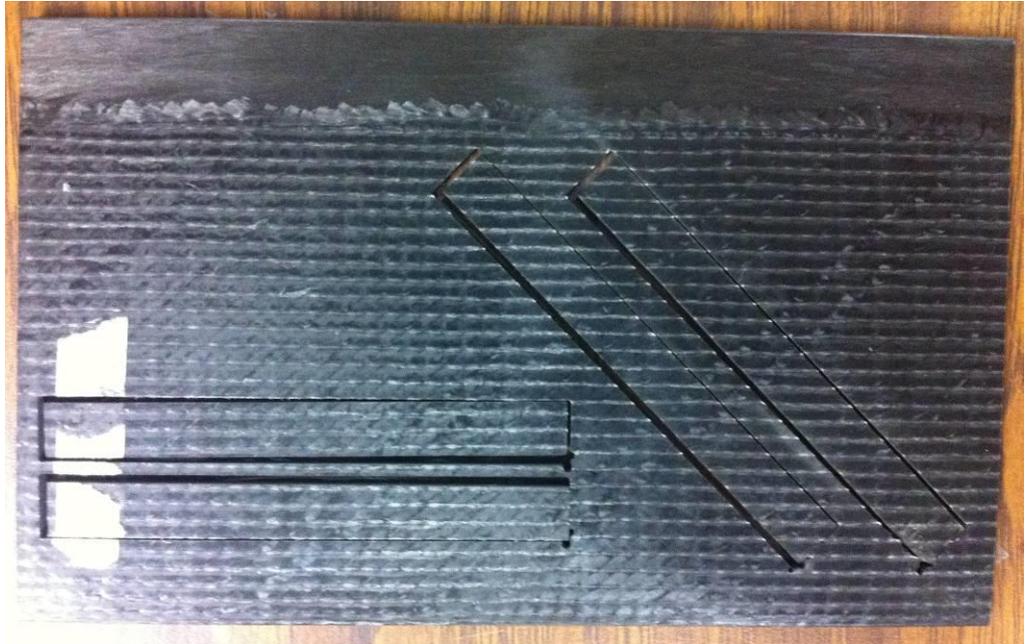


Figura 5.22 Probetas de material compuesto de fibra de carbono cortadas a 0° y 45° con respecto a la dirección de laminación.

Dichas probetas se ensayaron en una maquina universal Shimadzu modelo Autograph AgX de 300kN de capacidad (Figura 5.19)



Figura 5.23 Probetas rectangulares a diferentes ángulos ensayadas a tensión en maquina universal Shimadzu.

5.6.2 ENSAYO DE TENSION EN ALUMINIO

Utilizando las dimensiones mostradas en la Figura 5.20 cortadas en la placa de aleación de aluminio 6061 T6 de 1/8 de espesor mostrada en la figura 5.1 se obtuvieron probetas para el ensayo de tensión del aluminio 6061 individualmente.

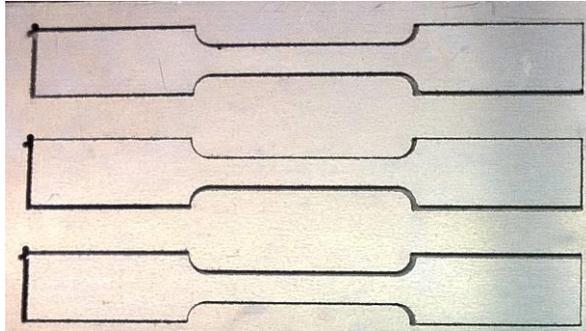


Figura 5.24 Probetas para ensayo de tensión cortadas de una placa de aleación de aluminio 6061 T6 de 1/8 de espesor.

Estas probetas se ensayaron en la maquina universal marca Shimadzu de la figura 5.19 para evaluar la resistencia que presenta dicha aleación de aluminio. Se utilizó una velocidad del cabezal de 10 mm/min y se realizaron 3 ensayos.

5.6.3 ENSAYO DE TENSION EN MATERIAL COMPUESTO

Al igual que con la aleación de aluminio 6061 T6, el material compuesto también se ensayó a tensión individualmente para evaluar tanto sus propiedades como su mecanismo de fractura y como se lleva éste a cabo en el material compuesto.

Debido a que el material compuesto de fibra de carbono posee una resistencia mucho mayor a la del aluminio, se comporta como una placa frágil y la resina tiende a ser desbastada, los ensayos a tensión en probetas de material compuesto de fibra de carbono tienden a fallar debido a que las probetas se deslizan sobre las mordazas de la maquina universal [30].

Tomando en cuenta la posibilidad de tal inconveniente, se decidió realizar los ensayos de tensión en una maquina universal con mordazas automáticas, las cuales conforme se realiza el ensayo y el material comienza a patinar, automáticamente se adaptan a la nueva geometría del material, siempre aplicando la presión adecuada para evitar el deslizamiento de las probetas.



Figura 5.25 Maquina Universal MTS con mordazas de presión automáticas.

5.6.4 ENSAYO DE TENSION EN SANDWICH

Para realizar este ensayo fueron necesarias las probetas para tensión de aleación de aluminio 6061 T6 de 3/32 de espesor, las probetas para tensión de material compuesto de fibra de carbono, tanto las que tienen fibra de vidrio en la superficie, como las que tienen fibra de carbono, así como unir las utilizando el adhesivo estructural para formar la estructura sándwich.

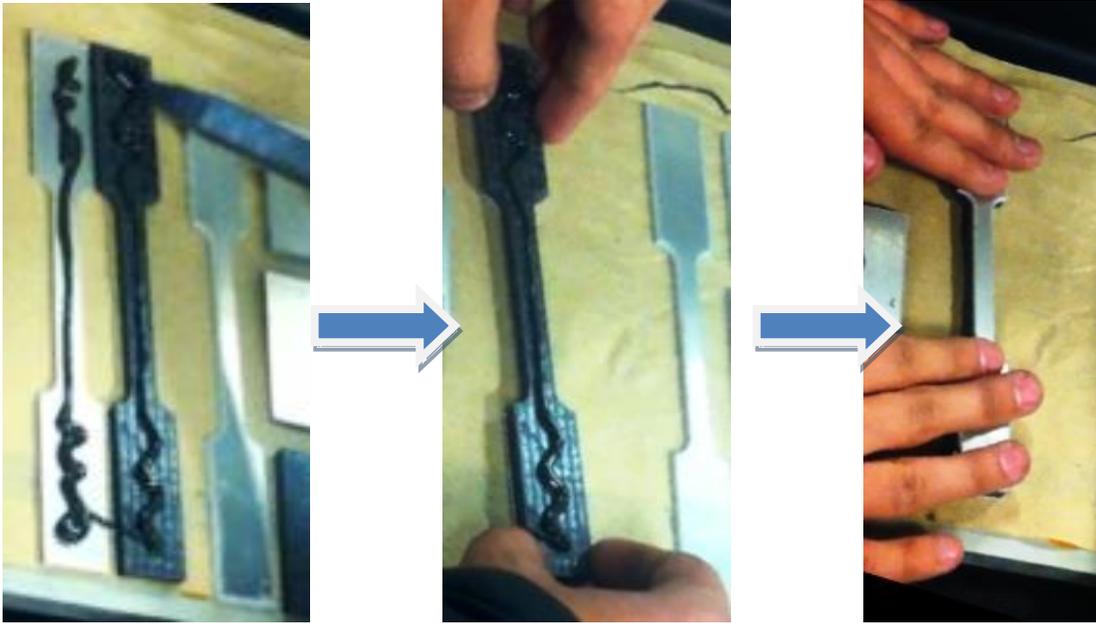


Figura 5.26 Aplicación del adhesivo y formación de estructura sándwich.



Figura 5.27 Estructura sándwich Al6061T6 – CFRC (Carbon Fiber Reinforced Composite) – Al6061T6.

5.7 ENSAYO DE ADHESIÓN

Para medir las propiedades de rigidez del adhesivo se fabricaron probetas rectangulares tanto de aluminio 6061 como de fibra de carbono de la misma medida.

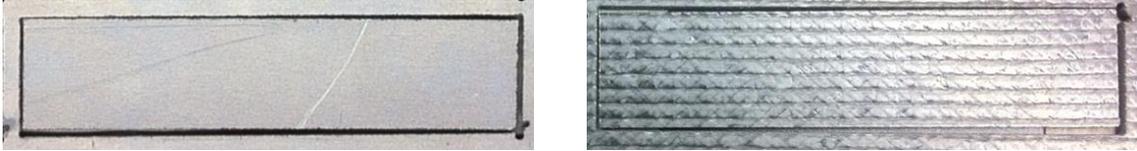


Figura 5.28 Probeta de 4.5 x 1 pulgadas de Al 6061 T6 y probeta de 4.5 x 1 pulgadas de CFRC.

Se planteó realizar pruebas con las probetas adheridas a traslape con un área de adhesión de una pulgada cuadrada y sometidas a tensión. Las medidas de las probetas fueron con respecto a la norma ASTM D1002-05, la cual aparece en la siguiente figura.

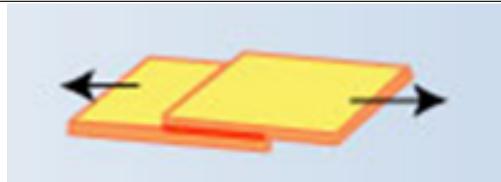
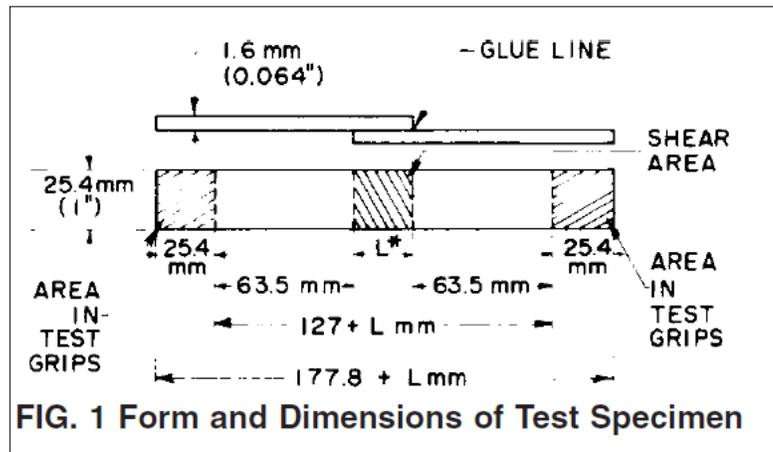


Figura 5.29 Norma ASTM D1002-05 Ensayo de adhesión a traslape [26].

El área de adhesión, con respecto a lo que recomienda el fabricante del adhesivo estructural, es que por lo menos sea de 1 pulgada cuadrada, por lo que el ensayo puede realizarse.

También se llevo a cabo el pre-tratamiento mencionado en el capítulo 5.1.3 por lo que se lijaron las superficies a unir tanto de aluminio como de fibra

de carbono con una lija Struers #80 y se limpió con alcohol para evitar una sujeción incorrecta.



Figura 5.30 Aplicación de adhesivo a superficies para formar la probeta del ensayo de adhesión a traslape.

Se le aplicó y se le mantuvo de igual manera una presión de 5kg durante todo el tiempo de curado del adhesivo, esto para asegurar la misma adhesión en cada una de las probetas.



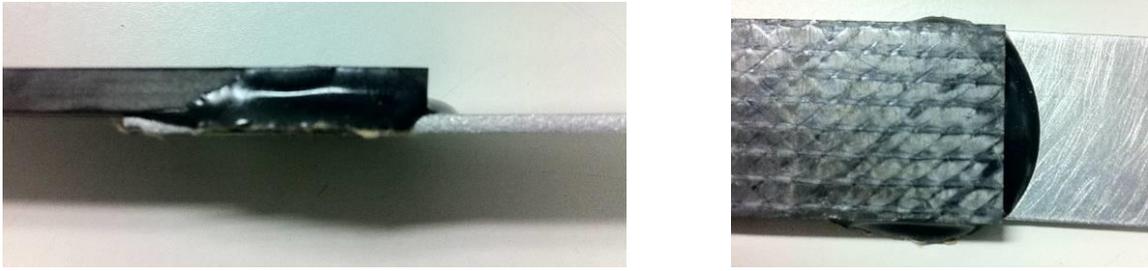


Figura 5.31 Probetas de aluminio 6061 T6 adheridas con adhesivo estructural a probeta de material compuesto de fibra de carbono.

Para observar de mejor manera la resistencia del adhesivo a distintos tiempos de curado se realizaron las pruebas a 2, 5 y 7 días después de la aplicación.

Se sometieron dos probetas durante cada uno de los días planteados.

Se utilizó una maquina universal para realizar las pruebas, éstas se realizaron a una velocidad de 10mm/min

Todas las probetas para el ensayo de adhesión se fabricaron en el laboratorio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, además de que el curado del adhesivo de las probetas ocurrió a temperatura ambiente durante diferentes tiempos de curado.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS Y DISCUSIONES

*Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo.
Albert Einstein*

6.1 CARACTERIZACIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO

La caracterización metalográfica de las muestras de aleación de aluminio 6061 T6 después del ataque químico fueron analizadas en un microscopio óptico, el cual muestra la microestructura de la aleación, el tamaño de grano y la forma del grano debido a la extrusión del aluminio. Además de permitirnos evaluar y comparar las imágenes tomadas a la aleación de aluminio antes y después de la deformación causada por los ensayos destructivos que se le llevaron a cabo a esta aleación.



Figura 6.1 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 10x

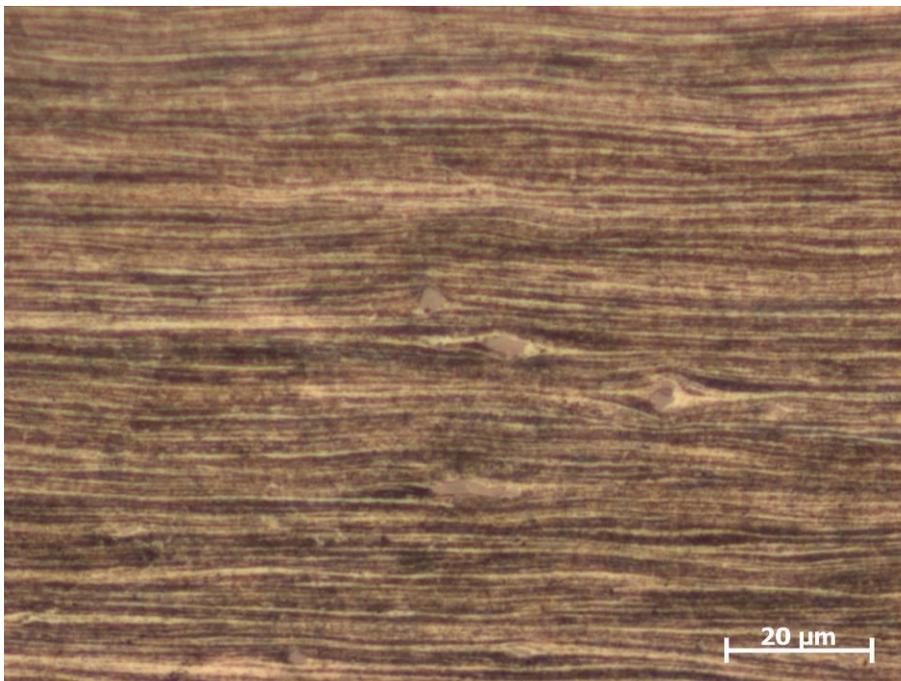


Figura 6.2 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 50x

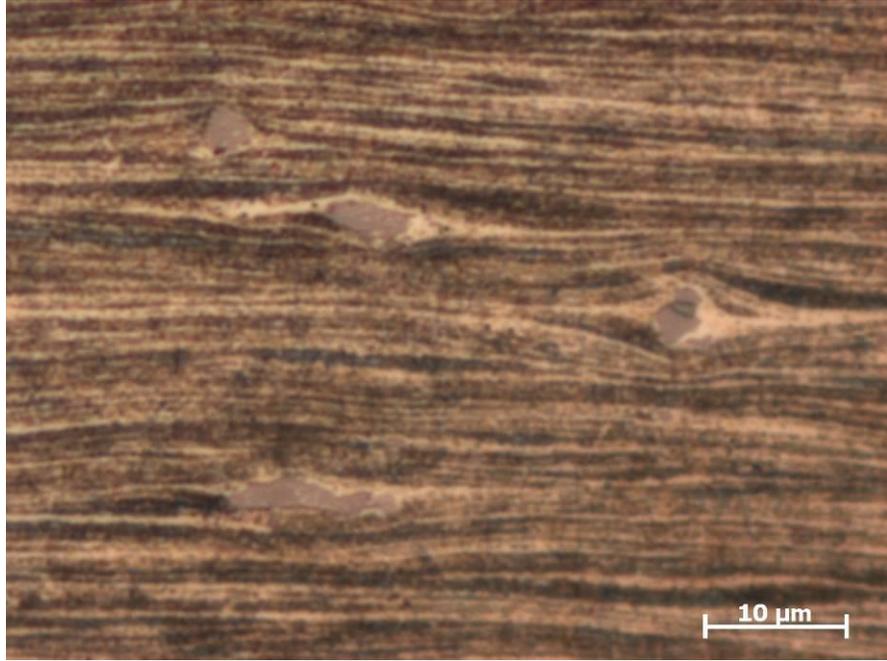


Figura 6.3 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 100x



Figura 6.4 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 10x

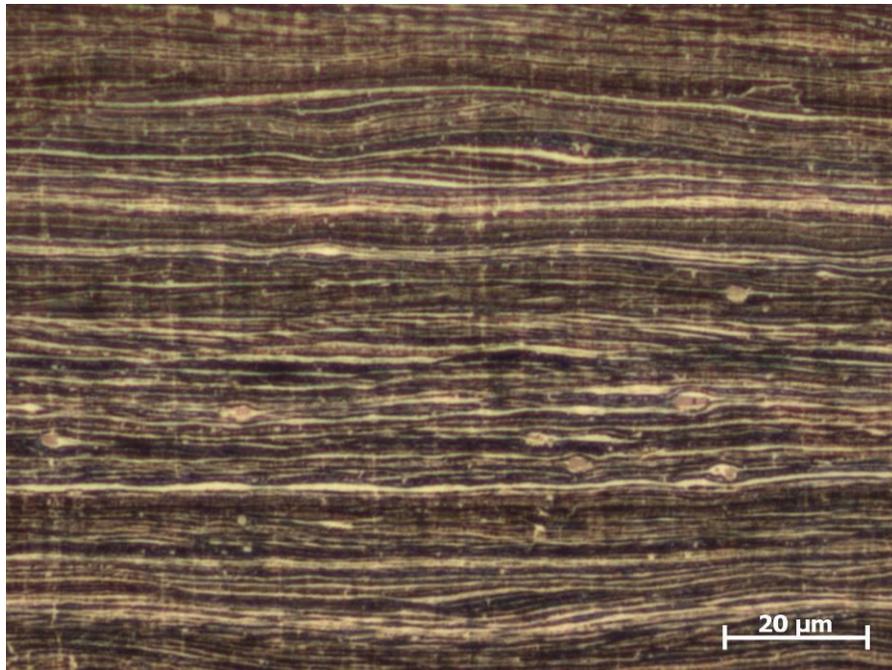


Figura 6.5 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 50x

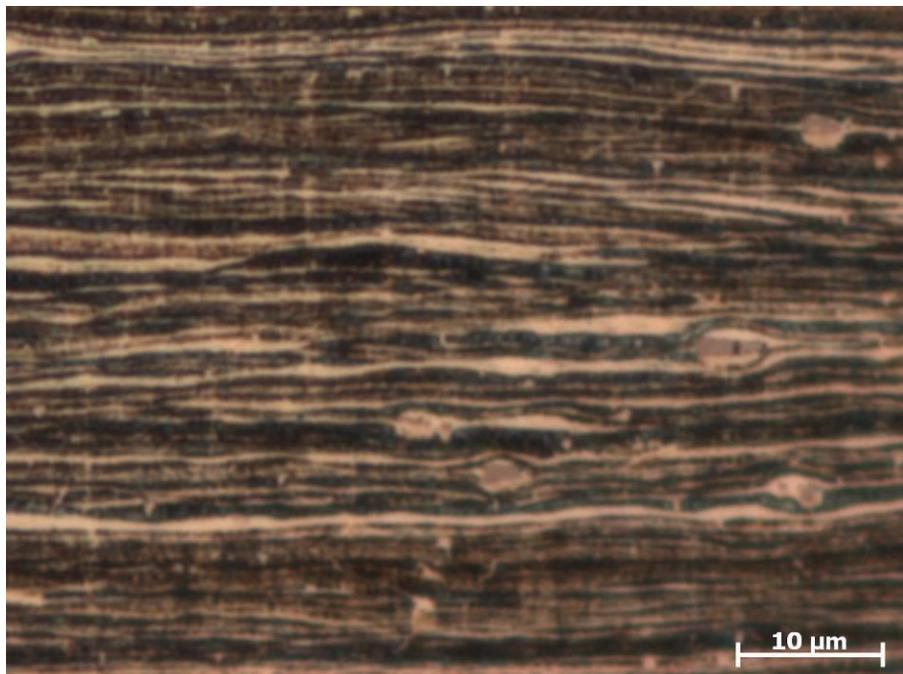


Figura 6.6 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 100x

6.2 MICRODUREZA

La microdureza Vickers se determino como el promedio de los datos obtenidos eliminando la lectura mayor y la lectura menor del ensayo como se muestra en la siguiente tabla.

Microdureza Vickers		Microdureza Vickers	
Antes del ensayo		Después del ensayo	
Carga (mN)	2940	Carga (mN)	2940
Tiempo (s)	5	Tiempo (s)	5
HV1	74.1	HV1	78.3
HV2	75	HV2	76.7
HV3	73	HV3	76.6
HV4	72.1	HV4	73.7
HV5	73.9	HV5	76.7
HV6	70.5	HV6	78.4
HV7	69.1	HV7	79.6
HV8	72	HV8	78
HV9	74.1	HV9	79.4
HV10	74.7	HV10	79.9
HV	73.05	HV	77.6

Tabla 6.1 Resultados microdureza Vickers en AA 6061 T6 antes de la deformación.

6.3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL COMPUESTO

Se llevo a cabo la caracterización de las placas reforzadas con fibras de carbón, con y sin fibra de vidrio utilizando los siguientes equipos: estereoscopio, para observar de mejor manera la superficie de las placas de material

compuesto, microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la orientación y el empaquetamiento de las fibras.

Se obtuvieron dos diferentes placas una identificada como CF (Carbon Fiber) y la otra como GF (Glass Fiber), sin embargo de acuerdo a los estudios realizados ambas están elaboradas con fibras de carbón, solo que una cuenta solamente con fibras de carbón orientadas en dirección de la fabricación en su interior y en la superficie fibras igualmente de carbón orientadas a 45° principalmente. La segunda (GF) cuenta con fibras de carbón orientadas en dirección de la fabricación y en la superficie fibras de vidrio orientadas a 45° en ambos casos la sección superficial es de aproximadamente 1 mm de espesor lo que representa aproximadamente un 20% del espesor total de la placa. A continuación se detalla la caracterización de las fibras.

6.3.1 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Las imágenes tomadas por microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) se realizaron en corte transversal de la parte central de la placa para observar las fibras longitudinalmente orientadas en dirección de la fabricación, así como la superficie con fibras de forma transversal que se encuentran en la superficie y que tienen una orientación de 45°

Además se analizaron por difracción de rayos x las composiciones de ciertas zonas, esto debido a que ciertas imágenes muestran contaminantes o elementos cuya composición no se conoce.

Fibra de Carbono



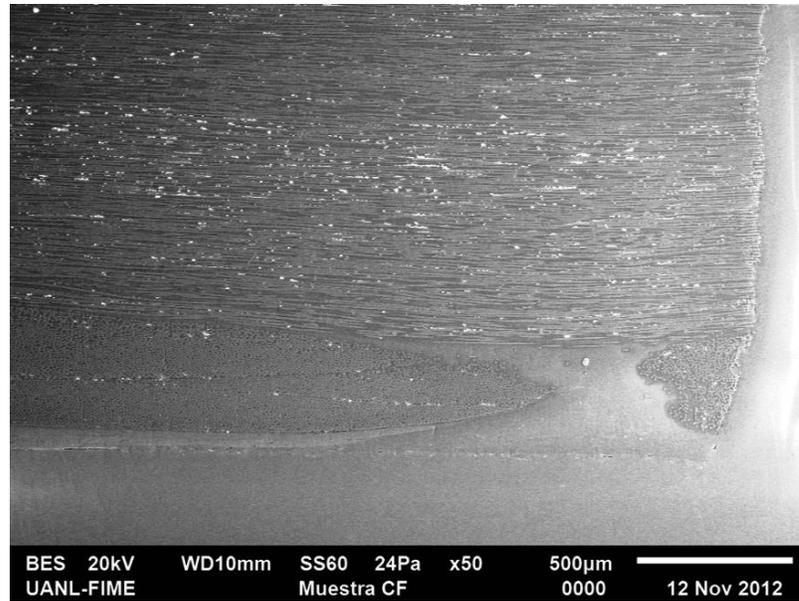


Figura 6.7 Imagen tomada por SEM a 50 x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono.

Se observan las fibras en la parte central orientadas a 0° en dirección de la fabricación y fibras transversales con orientación de 45° .

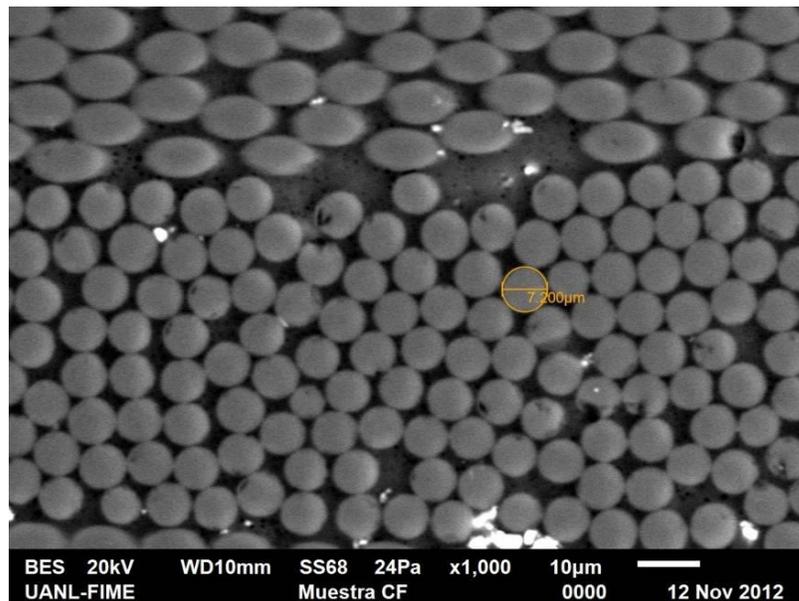


Figura 6.8 Imagen de SEM a 1000x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono.

Se observan en el material compuesto fibras transversales con morfología ovalada que indican que la fibra lleva una orientación de 45°, además se observan fibras con morfología circular que indica que pudieran tener una orientación de 90° en dirección de la fabricación de la placa. Además podemos calcular que el diámetro de las fibras es de aproximadamente 7 micras.

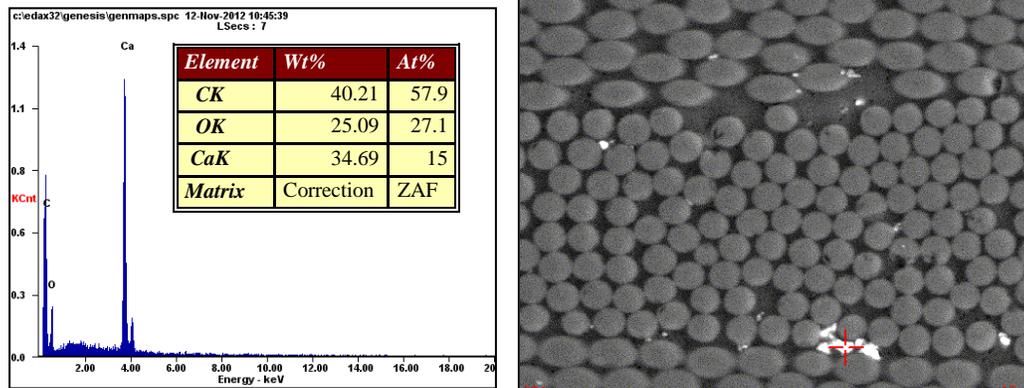


Figura 6.9 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.

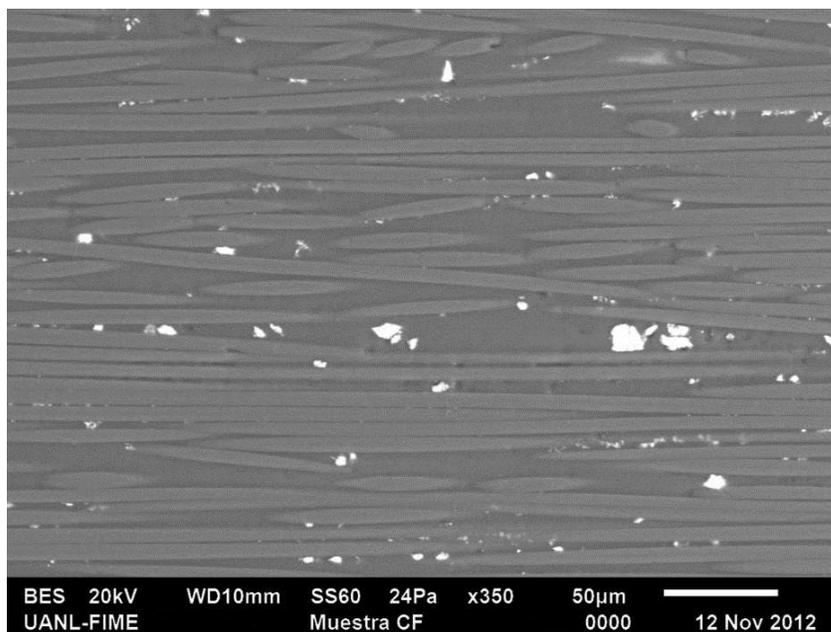


Figura 6.10 Imagen por SEM de fibras longitudinales a 350x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono.

Se observan partículas que pudieran ser contaminantes de fibra de vidrio utilizado en la fabricación de otros productos,

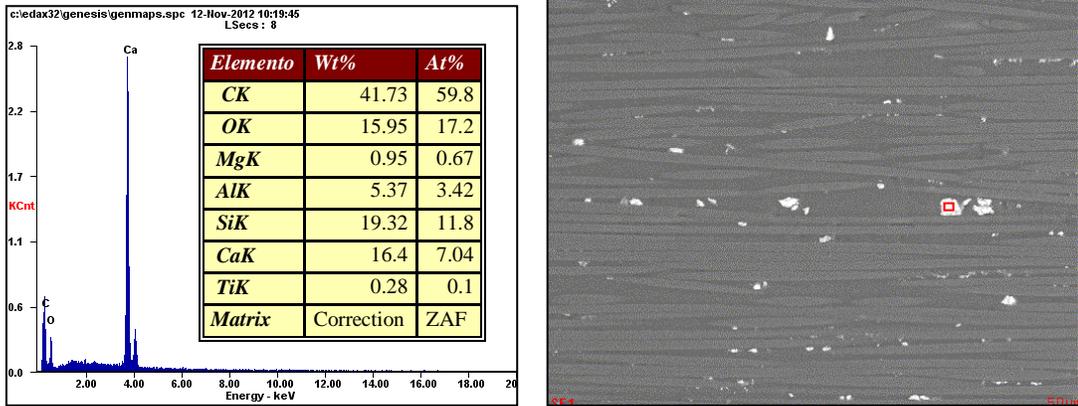


Figura 6.11 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.

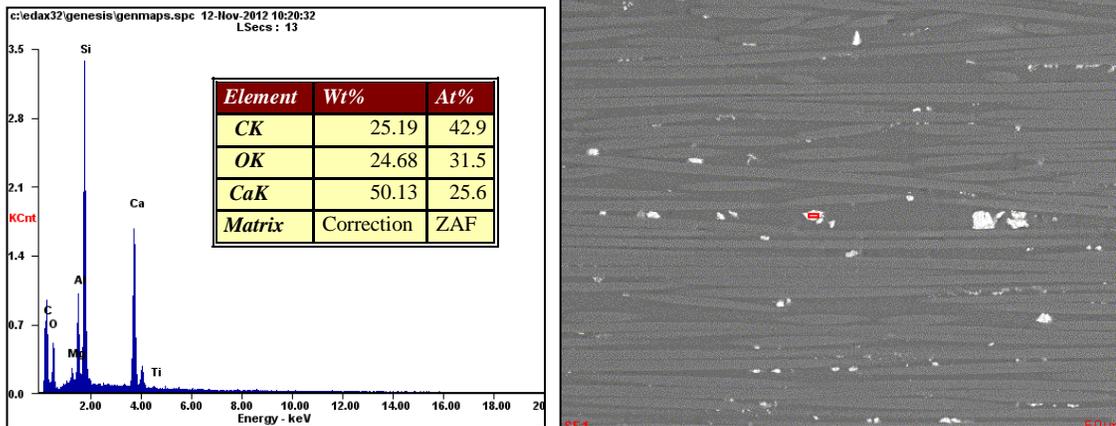


Figura 6.12 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.

Fibra de Carbono con superficie de Fibra de Vidrio

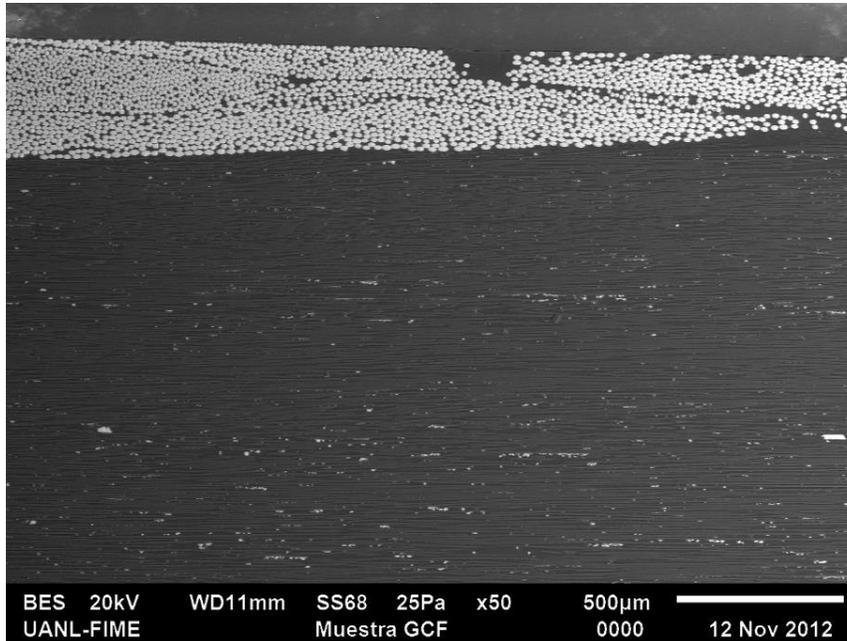


Figura 6.13 Imagen tomada por SEM a 50 x donde se observan las fibras de carbón en la parte central orientadas a 0° en dirección de la fabricación y fibras de vidrio transversales con orientación de 45°

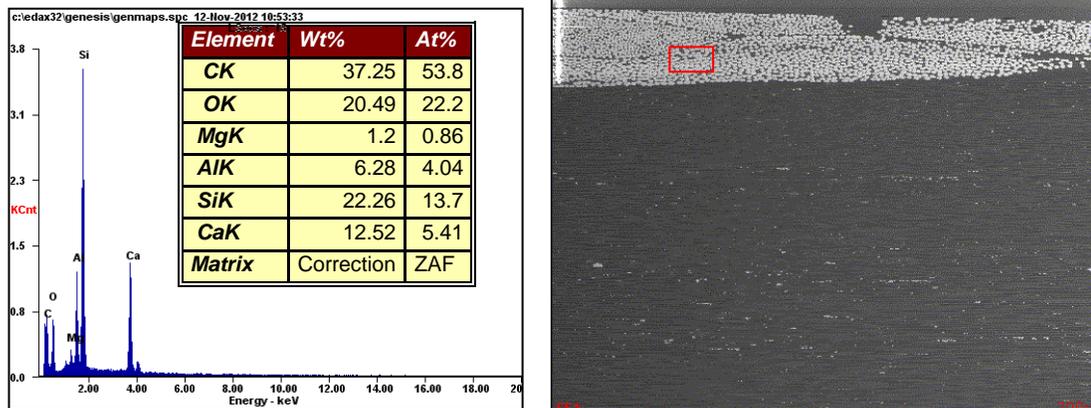


Figura 6.13 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.

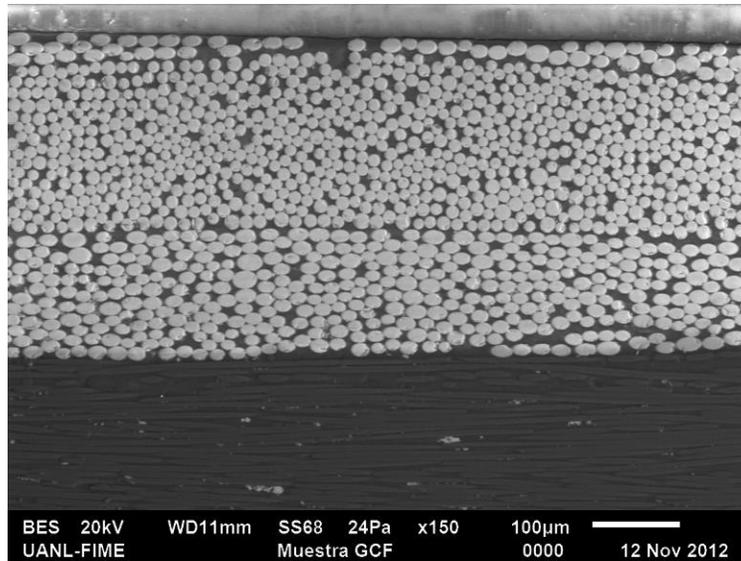


Figura 6.14 Imagen tomada por SEM a 150x en material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.

Se observan fibras transversales con morfología ovalada y circular que indican que las fibras llevan una orientación de 45° y 90°, respectivamente con respecto a la dirección de fabricación.

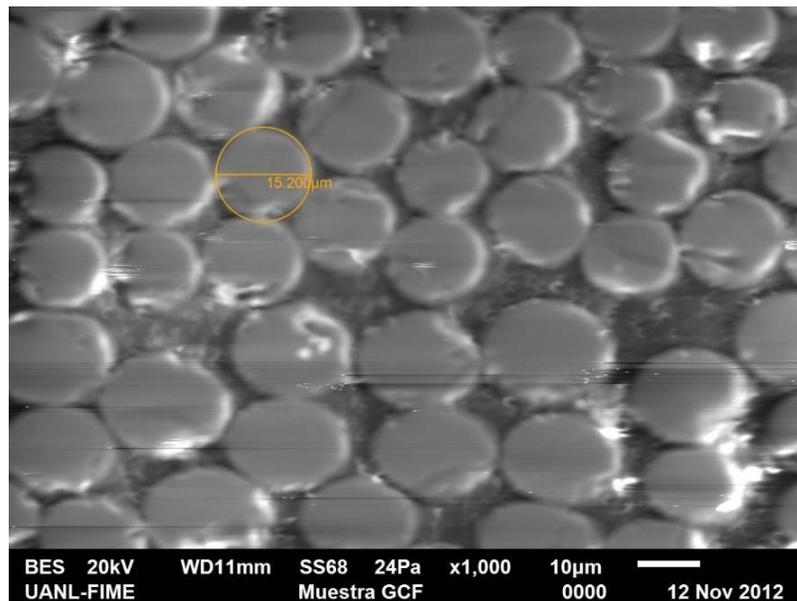


Figura 6.15 Imagen tomada por SEM a 1000x en material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.

Se observan fibras transversales con morfología ovalada que indican que la fibra lleva una orientación de 45°, además se observan fibras con morfología circular que indica que pudieran tener una orientación de 90 ° en dirección de la fabricación de la placa. El diámetro de las fibras es de alrededor 15 micras.

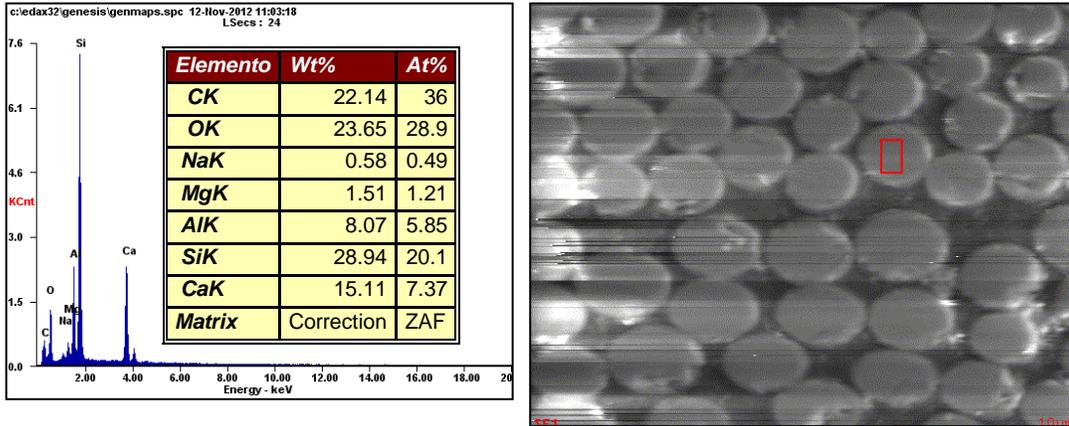


Figura 6.16 Figura 6.13 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.

6.3.2 ESTEREOSCÓPIO

La observación de las muestras de material compuesto mediante estereoscopio antes de cualquier tipo de ensayo destructivo aplicado sobre ellas se realizó de la siguiente forma, como se puede ver en el siguiente esquema, se corto una sección de la placa y se tomaron imágenes de forma transversal utilizando un estereoscopio con cámara de adquisición de imágenes. Se observan las fibras de carbón orientadas en un corte transversal y en la superficie se observa las fibras con una orientación diferente que sería a 45°.

Fibra de Carbono con superficie Fibra de Carbono.

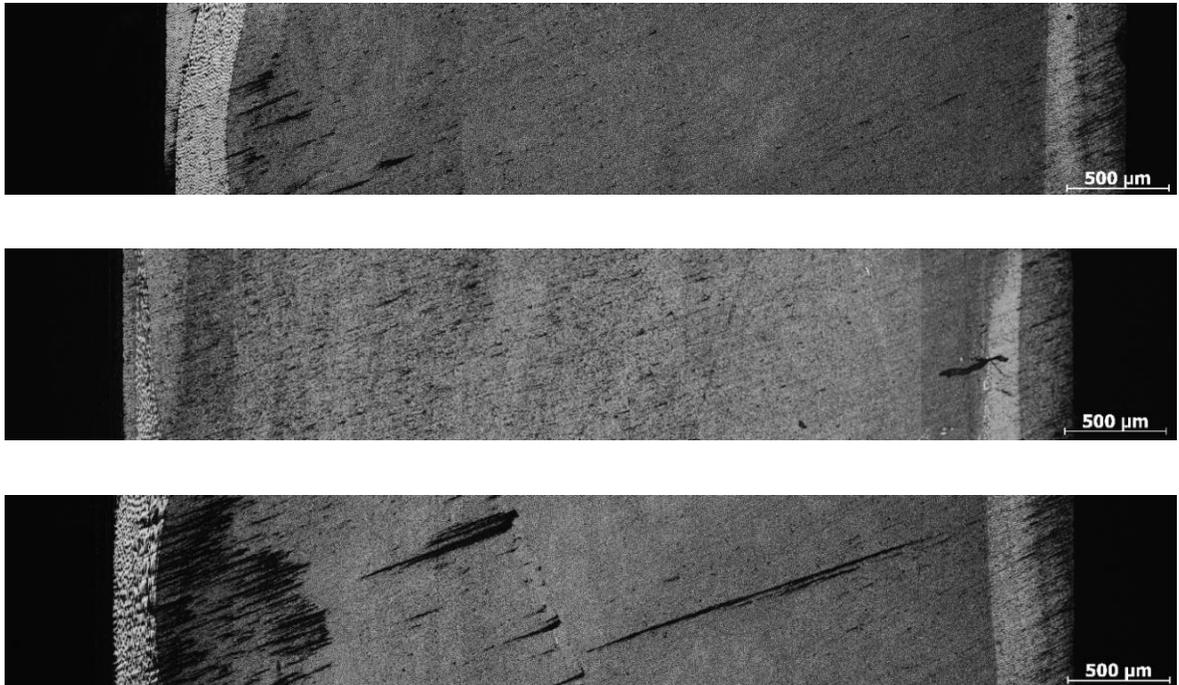


Figura 6.17 Imagen de estereoscopia a una magnificación de 25x en material compuesto de fibra de carbono.

Se observa que las mediciones de la sección superficial indican que en los extremos se cuentan con alrededor de 0.5 mm de fibra orientada a 45°, el ancho total de la placa es de 4.6 mm.

Fibra de Carbono con superficie de Fibra de Vidrio



Figura 6.18 Imagen de estereoscopio a una magnificación de 25x en material compuesto de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie.

Se obtuvieron imágenes donde se observa que las mediciones de la sección superficial indican que de un extremo se cuentan con alrededor de 0.5 mm de fibra orientada a 45° y en el otro extremo alrededor de 0.25 mm, el ancho total de la placa es de 4.6 mm.

Fractura de material compuesto

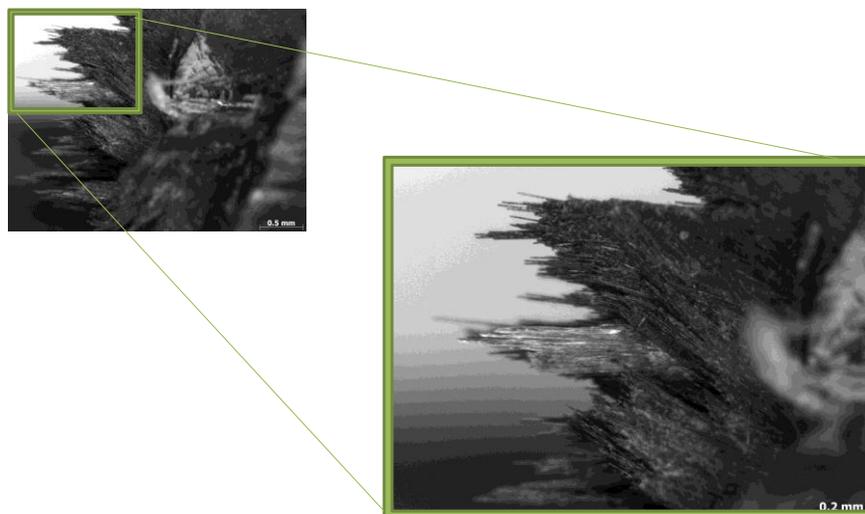


Figura 6.19 Imagen de fractura de material compuesto de fibra de carbono.

6.4 ENSAYO DE ANGULO

El ensayo de ángulo se realizó para comparar la resistencia del material compuesto cortado a 0° y a 45° con respecto de la dirección de fabricación, utilizando probetas de 100 x 10 mm a tensión, y los resultados se muestran en la siguiente tabla.

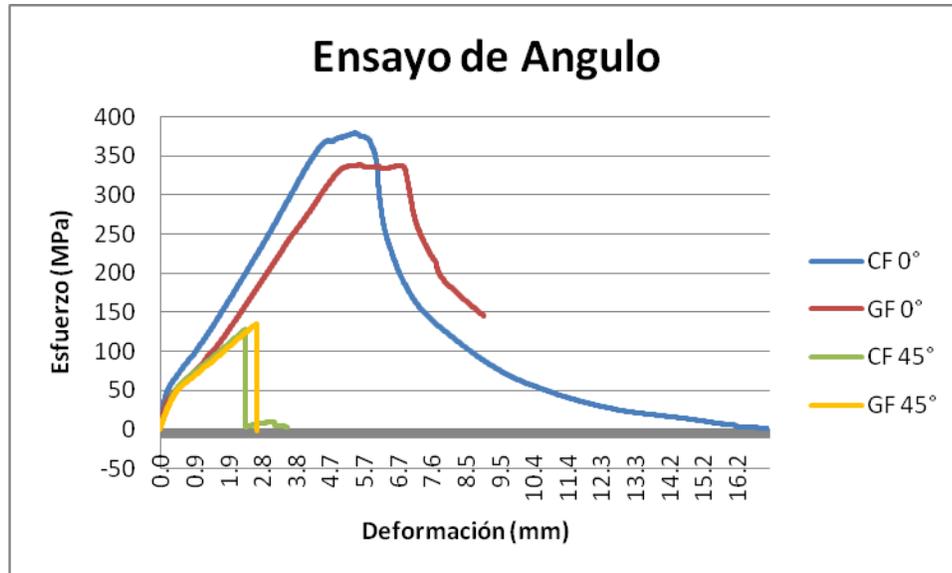


Figura 6.20 Tabla comparativa de resistencia a tensión de material compuesto a 0° y 45° de la dirección de fabricación.

Es necesario informar que en la tabla, los valores máximos correspondientes a los ensayos en las probetas cortadas a 0° con respecto a la dirección de fabricación no son reales, esto debido a que las probetas no se pudieron ensayar por completo, ya que se deslizaron debido a su alta resistencia.

Por su parte, las probetas cortadas a 45° con respecto a la dirección de fabricación mostraron muy poca resistencia antes de la fractura.



Figura 6.21 Fractura de probeta de material compuesto de fibra de carbono cortada a 45° de la dirección de fabricación.

La imagen anterior muestra la fractura de la probeta de material compuesto de fibra de carbono cortada a 45° de la dirección de fabricación, la cual fue a 45° con respecto a su corte, es decir, la fractura ocurrió en la dirección de fabricación de la placa completa de material compuesto. Esto se debe a que el esfuerzo a tensión recayó sobre muy pocas fibras, ya que no todo el material compuesto está orientado a 0° .



Figura 6.22 Deslizamiento de probeta de material compuesto de fibra de carbono cortada a 0° de la dirección de fabricación debido a la alta resistencia de la misma.

6.5 ENSAYO DE ADHESIÓN

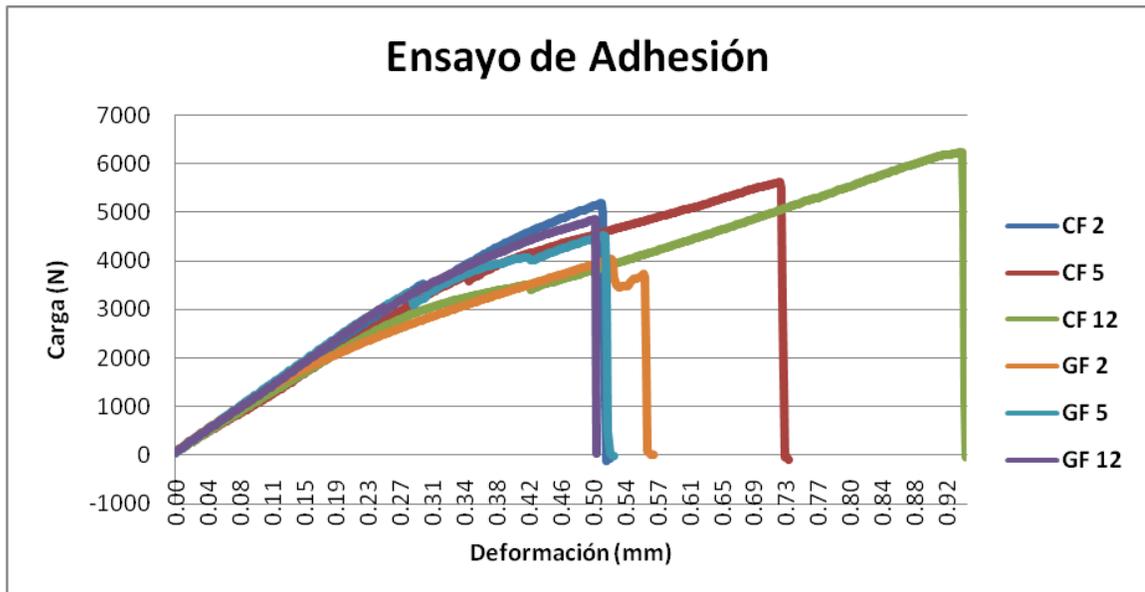


Figura 6.23 Gráfica comparativa de la resistencia del adhesivo estructural usando aluminio con CF y GF de superficie de adhesión a diferentes tiempos de curado.

La gráfica anterior muestra el aumento en la resistencia conforme el tiempo de curado aumenta, también muestra que el adhesivo estructural tiene mejor adhesión con la superficie de fibra de carbono que con la superficie de fibra de vidrio del material compuesto.

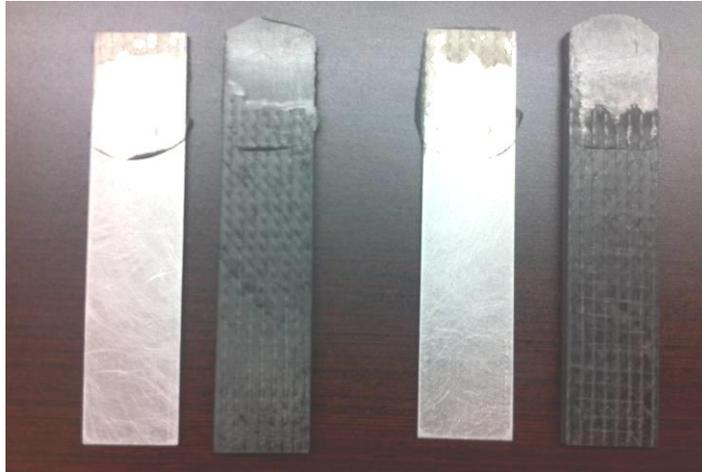


Figura 6.24 Imagen de probetas de aluminio 6061 T6 y CF-GF (izq.) y de aluminio 6061 T6 y CF-CF (der.) después del ensayo de adhesión.

En la imagen anterior se muestra como el adhesivo permanece casi en su totalidad en el material compuesto, mas en la fibra de carbono que en la fibra de vidrio, por lo que resistió cargas mayores.

Debido a la poca adhesión del adhesivo estructural con el aluminio, se recomienda realizar otro ensayo de adhesión, aplicando un granallado en la probeta de aluminio y evaluar nuevamente el adhesivo.

6.6 ENSAYO DE TENSION EN ALUMINIO

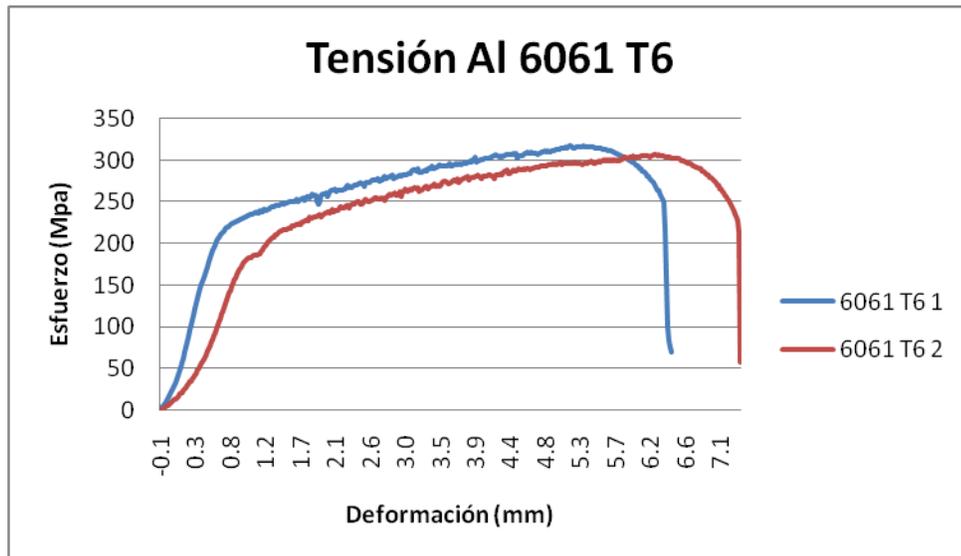


Figura 6.25 Gráfica de ensayo a tensión de probetas de aluminio 6061 T6.

En la grafica anterior se muestra la resistencia a la tensión del aluminio 6061 con el tratamiento térmico T6 ensayado a una velocidad del cabezal de 10 mm/min.

Se obtuvieron resultados de esfuerzo máximo de 317Mpa y un esfuerzo último de 251 Mpa en el primer ensayo y se obtuvo un esfuerzo máximo de 306 Mpa y un esfuerzo último de 237 Mpa en el segundo ensayo.



Figura 6.26 Probeta de aluminio 6061 T6 después de la deformación debida al ensayo de tensión.

6.7 ENSAYO DE TENSION EN MATERIAL COMPUESTO

Debido al deslizamiento que ocurre en las probetas de fibra de carbono al momento de realizarle un ensayo a tensión, se decidió utilizar una maquina universal con mordazas automáticas, esto evitó el deslizamiento de las mismas ejerciendo mayor presión transversal conforme se lleva a cabo el ensayo.



Figura 6.27 Probeta de material compuesto de fibra de carbono en maquina universal con mordazas automáticas.

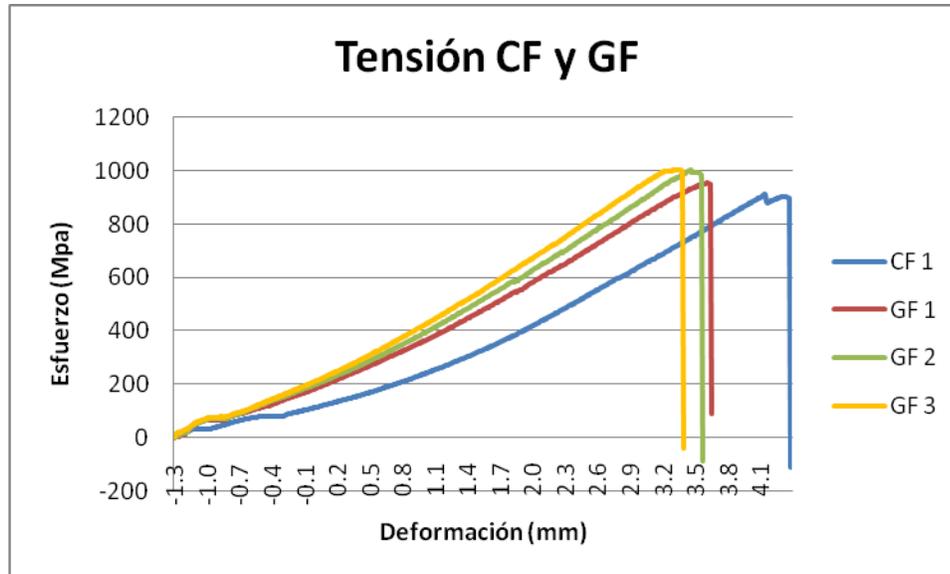


Figura 6.28 Grafica comparativa de ensayos a tensión en probetas de material compuesto CF-GF y CF-CF.

La grafica anterior demuestra la alta resistencia del material compuesto cuando este se tiene sus fibras orientadas en el mismo sentido que el ensayo, el material compuesto con fibra de vidrio en la superficie mostró ligeramente mayor esfuerzo máximo que el material compuesto con fibra de carbono en la superficie. Todas las probetas mostraron un comportamiento completamente frágil y existe una diferencia en la deformacion antes de la ruptura.

Se obtuvieron resultados de esfuerzo máximo de 904 Mpa en el material compuesto con fibra de carbono en la superficie y se obtuvo un esfuerzo máximo de 955 Mpa, 1001 Mpa y 1004 Mpa en el material compuesto con fibra de vidrio en la superficie.

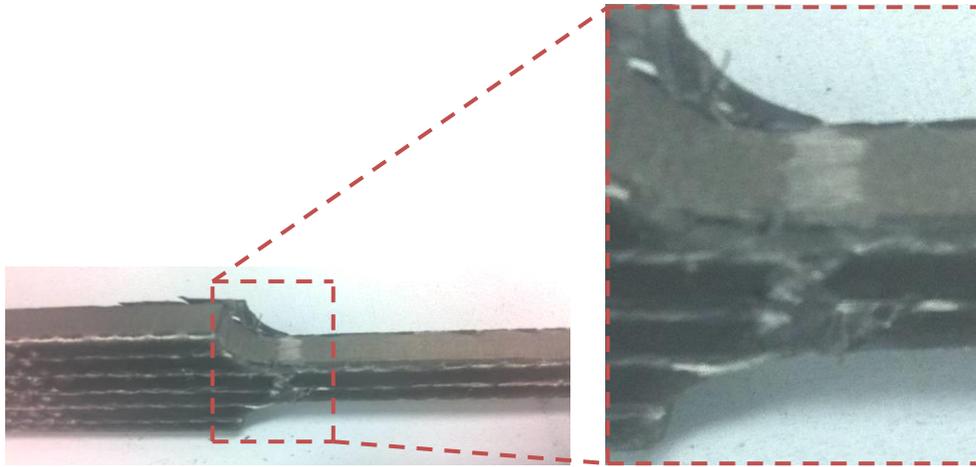


Figura 6.29 Probeta de material compuesto de fibra de carbono después de ser ensayada a tensión.

Todas las probetas de material compuesto se fracturaron en la zona donde empieza la sección reducida de la probeta como se muestra en la Figura 6.26.



Figura 6.30 Probeta de material compuesto de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie después del ensayo de tensión

Después de llevarle a cabo el ensayo a tensión a una probeta de material compuesto con fibra de vidrio en la superficie, no se removi6 la probeta de la maquina universal, se continu6 con una nueva prueba para evaluar el comportamiento de la resina con las fibras ya fracturadas para tambi6n medir su resistencia y el resultado fue el siguiente.



Figura 6.31 Gráfica del ensayo a tensión después de fracturadas las fibras en una probeta de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie.

Como se esperaba, la gráfica anterior nos muestra el comportamiento de la resina, la cual corresponde al de los elastómeros teniendo como esfuerzo máximo 124 Mpa.

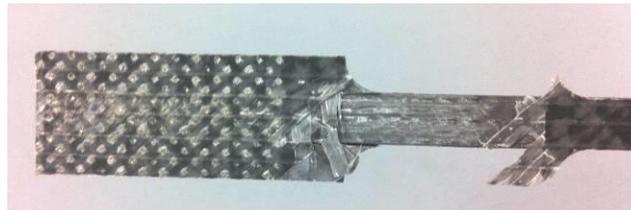


Figura 6.32 Imagen de probeta de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie después del ensayo de tensión después de la fractura de las fibras.

La probeta no se fracturó y mostró una gran plasticidad, debido a que se deformó tanto que la maquina dio por terminado el ensayo.

6.8 ENSAYO DE TENSION EN SANDWICH

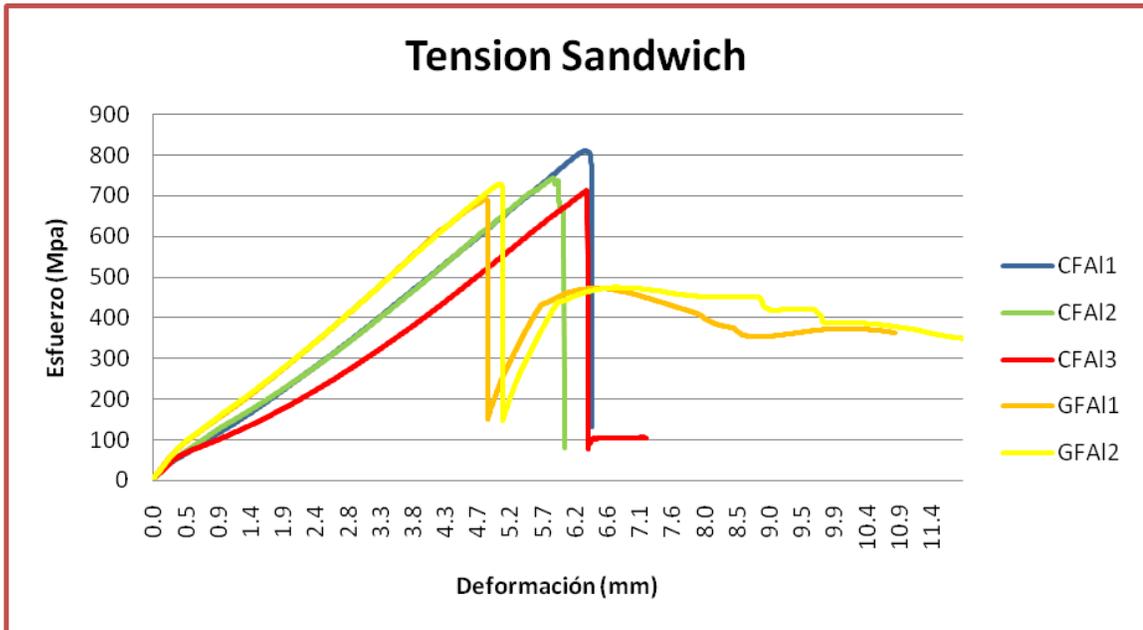


Figura 6.33 Grafica comparativa de la resistencia de las estructuras sandwich utilizando aluminio 6061 T6 y CF-CF o CF-GF composite adheridos con un adhesivo estructural en un ensayo a tensión.

La gráfica anterior muestra la diferencia entre la estructura sandwich utilizando diferentes materiales compuestos durante el ensayo de tensión, en el cual los resultados son muy parecidos a los del material compuesto ensayado individualmente, solo muestran menor resistencia debido a que debido al aluminio y al adhesivo, hacen que el área sea mayor por lo que el esfuerzo se calcula menor aunque la estructura resista más.

Los esfuerzos máximos que mostraron las estructuras sandwich fueron 812Mpa, 743 Mpa y 714 Mpa en las estructuras sandwich con fibra de carbono en la superficie del material compuesto y 693 Mpa y 729 Mpa en las estructuras sandwich con fibra de vidrio en la superficie del material compuesto



Figura 6.34 Imágenes de la fractura de las fibras internas (izq), de la fractura del aluminio (centro) y de la probeta de la estructura sandwich fracturada despues del ensayo (der).

En la estructura sandwich no fracturó todo como un solo cuerpo, fue fracturando por partes, empezando con las fibras internas, seguido por el adhesivo, debido a que se muestran las probetas un poco deslizadas al final del ensayo, despues fracturo el aluminio y por ultimo la resina del material compuesto.

Además, se ensayaron dos probetas después de la fractura interna de las fibras para medir la resistencia del aluminio con la resina del material compuesto y los esfuerzos máximos que se mostraron fueron de 473 Mpa y 475 Mpa.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

*La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes.
Samuel Butler*

- ❖ Se determinó que no es necesario utilizar un aluminio de gran resistencia como parte de la estructura sándwich, esto debido a que la resistencia de la estructura la proporciona el material compuesto. Solo es necesario que tenga mejores propiedades mecánicas que la resina del material compuesto.
- ❖ El material compuesto se comporta como un material frágil, sin embargo, después de fallar mecánicamente, la resina sigue presentando resistencia, aunque esta sea muy baja comportándose como un elastómero.
- ❖ La estructura sándwich no presenta falla catastrófica, solo presenta fractura interna de las fibras, sin embargo después de ésta, la estructura sigue unida, aunque con menor resistencia.

- ❖ La resistencia mecánica de la estructura sándwich, supera a muchas aleaciones de acero de alto desempeño, además de reducir el peso de la estructura y evitando la corrosión en la misma.

- ❖ La orientación de las fibras en el material compuesto deben ser orientadas dependiendo de la aplicación que se tenga, esto debido a que las fibras tienen un excelente desempeño solo en la dirección de laminación. El material compuesto entre menos isotrópico sea, menor será su resistencia.

- ❖ El adhesivo utilizado se adhiere de mejor manera al material compuesto que a la aleación de aluminio, esto debido a la alta rugosidad del material compuesto en comparación al acabado superficial de la aleación de aluminio.

- ❖ En cuanto a la adhesión entre las superficies de aluminio y material compuesto, entre mayor tiempo de curado, mayor es la resistencia y mayor es la deformación del adhesivo antes de la fractura.

CAPÍTULO 8

RECOMENDACIONES

*Ninguna cosa hay tan difícil como el arte de hacer agradable una buena recomendación.
Joseph Addison*

Se recomienda para continuar con este trabajo de investigación de caracterización de propiedades mecánicas y realizar como trabajo futuro las siguientes actividades:

- Añadirle rugosidad al aluminio utilizado para fabricar la estructura sándwich para aumentar la adhesión y por lo tanto, aumentar la resistencia del adhesivo.
- Utilizar otras aleaciones de aluminio para determinar si tienen mejores propiedades mecánicas que sean de utilidad para la fabricación de piezas automotrices. Se recomiendan aleaciones de la serie 2xxx y 7xxx así como la aleación 6013 T6 (con la cual se comenzó el proyecto pero se decidió por la 6061 T6).
- Realizar ensayos de fatiga tanto en el material compuesto y en la aleación de aluminio de manera individual como en la estructura sándwich para evaluar también el desempeño del adhesivo cuando se somete a fatiga.

- Realizar ensayos de impacto evaluando el nivel de absorción del mismo por parte de las aleaciones que se pretenda utilizar. Se recomienda realizar los ensayos tanto en el material compuesto y la aleación de aluminio individualmente, como en la estructura sándwich.

- Utilizar otros adhesivos estructurales, evaluar el tiempo de curado de los mismos y verificar si la resistencia varía si se acelera el tiempo de curado añadiéndole temperatura.

CAPÍTULO 9

REFERENCIAS

Cuando uno contempla a los grandes triunfadores, descubre que no son necesariamente los mejores, ni los más brillantes, ni los más fuertes, ni los más rápidos, pero si los más perseverantes.

Anthony Robbins

- [1] Callister W. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los materiales, Rervete S.A., 1995
- [2] Aceros avanzados de alta resistencia, Otea, 2008
- [3] Azkeland, D. Ciencia e Ingeniería de los materiales. 4ed. Thomson. 2006
- [4] Mayor resistencia - Menor peso, SAAB, 2006
- [5] Automoción, PLATEA, 2005
- [6] Leal S., Tesis de Maestría FIME -UANL. Caracterización de aceros inoxidable y estudio de su resistencia mecánica y confortabilidad, 2011
- [7] King F., Aluminum and its alloys. 1era Ed. Limusa. 1992
- [8] Schmitter A., Los materiales del futuro en carros. MyAutomovil. 2010.
- [9] Russell A. Structure-Property relations in nonferrous metals. Wiley. 2005

- [10] de la Garza, M. Tesis de Maestría FIME -UANL. Caracterización de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopia de fuerza atómica, 1999
- [11] ASM Metals Handbook vol. 2 Properties and Selection, Non-ferrous Alloys and Special Purpose.
- [12] Campbell F.C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier, 2006
- [13] Cavazos J. Tesis de doctorado FIME -UANL, Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063, 1998
- [14] Torres S. Influence of plastic deformation in 6061-T6 aluminum alloy welded specimens on the hardness characteristics, 2008
- [15] Echavarría A. y Orrego G., Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas y laminadas, CIDEMAT, Colombia, 2010
- [16] Paris F. Introducción al análisis y diseño de materiales compuestos, Universidad de Sevilla, 2006
- [17] Mazumdar S. Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering, CRC Press, 2002
- [18] Jung Kim B. Characteristics of joining inserts for composite sandwich panels, Composite Structures, 2008
- [19] Ghassemieh E. Materials in automotive application, state of the art and prospects, University of Sheffield, 2011
- [20] Karunanidhi S. Futuro de la industria automotriz, 2012
- [21] Data Sheet Aluminum 6061 AMS QQA 250/11 6061 Advanced Metals International.
- [22] Struers knowledge, struers.com, Esmerilado y Pulido.
- [23] Dieter G., Mechanical Metallurgy SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988.

- [24] Users Guide to Adhesives, Huntsman, 2007.
- [25] Assesment of bonding, Advantages of adhesive bonding, Huntsman. 2007.
- [26] ASTM Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading D1002-05, 2007.
- [27] ASTM E8 / E8M - 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials E8 / E8M, 2007
- [28] ASM Metals Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures, 2004
- [29] Groover M., Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas, Prentice Hall, 1997.
- [30] ASM Metals Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation, 2000.
- [31] ASM Metals Handbook Volume 4 Heat Treating, 1991.
- [32] Vander Voort G. Metallographic Etching of Aluminum and Its Alloys, Buehler Ltd, EUA, 2009.
- [33] Genkin J. Corrosion Fatigue Performance of alloy 6013-T6, Tesis de Maestría, Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- [34] Poveda S. Representación normalizada de piezas de material compuesto.

APÉNDICE A

Ecuaciones utilizadas para determinar las curvas Esfuerzo verdadero vs. deformación verdadera correspondientes a los ensayos de tensión [23].

Deformación ingenieril:
$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4)$$

Esfuerzo ingenieril:
$$S = \frac{P}{A_0} \quad (5)$$

Deformación ingenieril prima:
$$e' = e - e_0 \quad (6)$$

Esfuerzo real:
$$\varepsilon = \ln(e') + 1 \quad (7)$$

Deformación real:
$$\sigma = S(e') + 1 \quad (8)$$

Ecuación de Hollomon:
$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (9)$$

LISTA DE TABLAS

Tabla – Nombre	Página
Tabla 3.1 Atributos de las aleaciones trabajadas de aluminio [12].	17
Tabla 3.2 Designaciones de temple para aleaciones de aluminio [3].	19
Tabla 3.3 Eutécticos del sistema Al-Mg-Si [15].	24
Tabla 3.4 Solubilidad del Mg ₂ Si en función de la temperatura y del exceso del magnesio en la matriz [15].	25
Tabla 4.1 Propiedades de las fibras de carbono, vidrio y Kevlar a 20°C [16].	38
Tabla 4.2 Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster usadas en los materiales compuestos [16].	41
Tabla 5.1 Composición química de una aleación de aluminio 6061 [21].	54
Tabla 5.2 Componentes del Reactivo de Weck [32].	69
Tabla 5.3 Cargas y tiempos aplicados en el ensayo de microdureza Vickers	70
Tabla 6.1 Resultados microdureza Vickers en AA 6061 T6 antes de la deformación.	88

LISTA DE FIGURAS

Figura - Nombre	Página
Figura 3.1 Propiedades físicas del aluminio [9].	14
Figura 3.2 Diagrama de fases correspondiente a la aleación AA6061 [15].	24
Figura 4.1 Clasificación de los materiales compuestos [16].	31
Figura 4.2 Configuración esquemática de varios materiales compuestos [16].	32
Figura 4.3 Perfiles de posición de estrés cuando la longitud de las fibras les igual (a) mayor (b) y menor (c) a la longitud crítica en un compuesto reforzado por fibras que está expuesto a un esfuerzo a tensión igual a la resistencia de la fibra a tensión [1].	39
Figura 5.1 Placa de Aleación de Aluminio 6061 T6 de 1/8 de espesor.	54
Figura 5.2 Placa de Aleación de Aluminio 6061 T6 de 3/32 de espesor.	55
Figura 5.3 Probetas para ensayos de tensión, adhesión y compresión con perforación cortadas con agua en una placa de aleación de aluminio 6061 T6.	56
Figura 5.4 Perfil de material compuesto de Fibra de Carbono con resina epóxica obtenida por el método de pultrusión.	57
Figura 5.5 Corte de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio utilizando una segueta convencional.	58
Figura 5.6 Corte de material compuesto de fibra de carbono mediante disco abrasivo.	59
Figura 5.7 Pieza de material compuesto de fibra de carbono recién cortada.	60
Figura 5.8 Cortes para probetas de tensión, adhesión y compresión con perforación en placa de material compuesto de fibra de carbono.	60
Figura 5.9 Adhesivo estructural Araldite 2014 de Huntsman.	61
Figura 5.10 Superficie de aluminio pre-tratada con lija Struers #80 y alcohol.	62
Figura 5.11 Resistencia típica de ensayo a traslape a diferentes tiempos de curado.	63
Figura 5.12 Cortadora de precisión marca Struers modelo Discoton-60.	64
Figura 5.13 Montadora marca Struers modelo CitoPress-10	65

Figura 5.14 Pulidora automática marca Struers modelo TegraPol-25.	66
Figura 5.15 Proceso de esmerilado según el método Struers A para materiales dúctiles [22].	67
Figura 5.16 Proceso de pulido según el método Struers A para materiales dúctiles [22].	68
Figura 5.17 Microscopio Óptico de platina invertida marca Axio modelo Observer Z1m.	69
Figura 5.18 Microdurómetro Shimadzu modelo HMV-2T.	71
Figura 5.19 Norma ASTM E8 para ensayos de tensión [27].	73
Figura 5.20 Maquina Universal marca Shimadzu modelo Autograph AgX de 300kN.	74
Figura 5.21 Dimensiones de probetas de tensión tanto para aluminio como para material compuesto.	75
Figura 5.22 Probetas de material compuesto de fibra de carbono cortadas a 0° y 45° con respecto a la dirección de laminación.	76
Figura 5.23 Probetas rectangulares a diferentes ángulos ensayadas a tensión en maquina universal Shimadzu.	77
Figura 5.24 Probetas para ensayo de tensión cortadas de una placa de aleación de aluminio 6061 T6 de 1/8 de espesor.	78
Figura 5.25 Maquina Universal MTS con mordazas de presión automáticas.	79
Figura 5.26 Aplicación del adhesivo y formación de estructura sándwich.	80
Figura 5.27 Estructura sándwich Al6061T6 – CFRC (Carbon Fiber Reinforced Composite) – Al6061T6.	80
Figura 5.28 Probeta de 4.5 x 1 pulgadas de Al 6061 T6 y probeta de 4.5 x 1 pulgadas de CFRC.	81
Figura 5.29 Norma ASTM D1002-05 Ensayo de adhesión a traslape [26].	81
Figura 5.30 Aplicación de adhesivo a superficies para formar la probeta del ensayo de adhesión a traslape.	82
Figura 5.31 Probetas de aluminio 6061 T6 adheridas con adhesivo estructural a probeta de material compuesto de fibra de carbono.	82

Figura 6.1 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 10x	85
Figura 6.2 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 50x	85
Figura 6.3 Fotomicrografía de AA 6061T6 antes del ensayo tomada a una magnificación de 100x	86
Figura 6.4 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 10x	86
Figura 6.5 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 50x	87
Figura 6.6 Fotomicrografía de AA 6061T6 después del ensayo tomada a una magnificación de 100x	87
Figura 6.7 Imagen tomada por SEM a 50 x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono	90
Figura 6.8 Imagen de SEM a 1000x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono.	90
Figura 6.9 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.	91
Figura 6.10 Imagen por SEM de fibras longitudinales a 350x en una muestra de material compuesto de fibra de carbono.	91
Figura 6.11 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.	92
Figura 6.12 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono.	92
Figura 6.13 Imagen tomada por SEM a 50 x donde se observan las fibras de carbón en la parte central orientadas a 0° en dirección de la fabricación y fibras de vidrio transversales con orientación de 45°	93
Figura 6.13 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio	93

Figura 6.14 Imagen tomada por SEM a 150x en material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.	94
Figura 6.15 Imagen tomada por SEM a 1000x en material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.	94
Figura 6.16 Figura 6.13 Composición química obtenida por SEM Rayos-X en muestra de material compuesto de fibra de carbono con superficie de fibra de vidrio.	95
Figura 6.17 Imagen de estereoscopio a una magnificación de 25x en material compuesto de fibra de carbono	96
Figura 6.18 Imagen de estereoscopio a una magnificación de 25x en material compuesto de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie	97
Figura 6.19 Imagen de fractura de material compuesto de fibra de carbono.	97
Figura 6.20 Tabla comparativa de resistencia a tensión de material compuesto a 0° y 45° de la dirección de fabricación.	98
Figura 6.21 Fractura de probeta de material compuesto de fibra de carbono cortada a 45° de la dirección de fabricación.	99
Figura 6.22 Deslizamiento de probeta de material compuesto de fibra de carbono cortada a 0° de la dirección de fabricación debido a la alta resistencia de la misma.	99
Figura 6.23 Gráfica comparativa de la resistencia del adhesivo estructural usando aluminio con CF y GF de superficie de adhesión a diferentes tiempos de curado.	100
Figura 6.24 Imagen de probetas de aluminio 6061 T6 y CF-GF (izq.) y de aluminio 6061 T6 y CF-CF (der.) después del ensayo de adhesión.	101
Figura 6.25 Gráfica de ensayo a tensión de probetas de aluminio 6061 T6.	102
Figura 6.26 Probeta de aluminio 6061 T6 después de la deformación debida al ensayo de tensión.	102
Figura 6.27 Probeta de material compuesto de fibra de carbono en maquina universal con mordazas automáticas.	103

Figura 6.28 Grafica comparativa de ensayos a tensión en probetas de material compuesto CF-GF y CF-CF.	104
Figura 6.29 Probeta de material compuesto de fibra de carbono después de ser ensayada a tensión.	105
Figura 6.30 Probeta de material compuesto de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie después del ensayo de tensión	105
Figura 6.31 Gráfica del ensayo a tensión después de fracturadas las fibras en una probeta de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie.	106
Figura 6.32 Imagen de probeta de fibra de carbono con fibra de vidrio en la superficie después del ensayo de tensión después de la fractura de las fibras.	106
Figura 6.33 Grafica comparativa de la resistencia de las estructuras sandwich utilizando aluminio 6061 T6 y CF-CF o CF-GF composite adheridos con un adhesivo estructural en un ensayo a tensión.	107
Figura 6.34 Imágenes de la fractura de las fibras internas (izq), de la fractura del aluminio (centro) y de la probeta de la estructura sandwich fracturada después del ensayo (der).	108

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación - Nombre	Página
Ecuación 1. Rigidez especifica	11
Ecuación 2. Esfuerzo especifico	11
Ecuación 3. Longitud crítica de las fibras	39
Ecuación 4. Deformación ingenieril	116
Ecuación 5. Esfuerzo ingenieril	116
Ecuación 6. Deformación ingenieril prima	116
Ecuación 7. Esfuerzo real	116
Ecuación 8. Deformación real	116
Ecuación 9. Ecuación de Hollomon	116