

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“ASPECTOS FÍSICOS Y FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD  
SUPERFICIAL EN EL MAQUINADO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS”**

**TESIS**

**EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES**

**PRESENTA:**

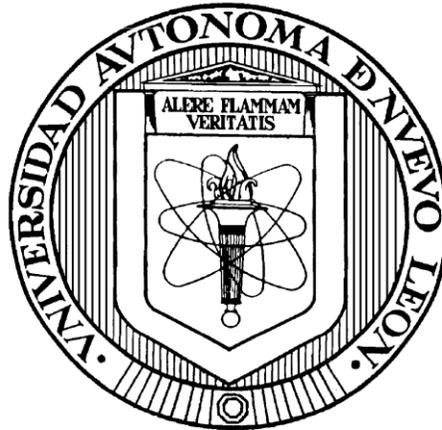
**DAVID ELIZONDO LOZANO**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN**

**JULIO 2014**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“ASPECTOS FÍSICOS Y FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD  
SUPERICIAL EN EL MAQUINADO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS”**

TESIS

EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES

PRESENTA:

DAVID ELIZONDO LOZANO

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2014

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**“ASPECTOS FÍSICOS Y FACTORES QUE DETERMINAN LA CALIDAD  
SUPERICIAL EN EL MAQUINADO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ  
POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS”**

TESIS

EN OPCIÓN PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES

PRESENTA:

DAVID ELIZONDO LOZANO

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2014

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

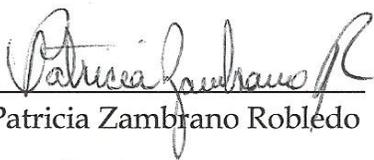
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **“Aspectos físicos y factores que determinan la calidad superficial en el maquinado de compósitos de matriz polimérica reforzados con fibras”** realizada por el alumno David Elizondo Lozano con número de matrícula **1265105** sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El comité de tesis



Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Asesor



Dra. Patricia Zambrano Robledo

Revisor



Revisor

Vo. Bo.



Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio del 2014

*Dedicatoria*

*A Dios*

*A mis padres*

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido mediante la oportunidad de estudiar una carrera de calidad junto con el apoyo económico brindado durante estos dos años de investigación.

Al Dr. Moisés Hinojosa Rivera, por el tiempo, paciencia y dedicación para compartir el conocimiento en la elaboración del proyecto.

Al Dr. Jean Christophe WAHL, por su paciencia y amistad brindada en mi duración de estancia dentro de la Universidad de Bordeaux 1, y por facilitarme todo lo necesario para llevar a cabo el trabajo de investigación.

A mis compañeros del grupo compuestos, por su valiosa ayuda y consejos relacionados a los temas de los materiales compuestos aeroespaciales.

A mis compañeros de generación, Jesús Puentes, Eric Garza, que gracias a sus consejos y motivaciones relacionadas en materia escolar durante mi estancia académica lograran incrementar en mi esa chispa de curiosidad hacia la investigación.

A mi familia, que gracias a ellos pude lograr un objetivo más en mi vida personal y por ende, se los dedico a ellos como la fuente de inspiración para iniciar y terminar el ciclo que se abrió al momento que se tomó la decisión de estudiar una especialidad dentro de mi carrera profesional .

Muchas gracias a todos

<b>Resumen</b>	11
<b>Introducción</b>	13

## **Capítulo 1. Materiales compuestos de matriz polimérica**

1.1	Introducción y clasificación de los materiales compuestos	17
1.2	Materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibras de vidrio y carbono	24
1.2.1	Matrices poliméricas	24
1.2.2	Refuerzos para matrices poliméricas	29
1.2.2.1	Fibra de vidrio	30
1.2.2.2	Fibra de carbono	33
1.3	Fabricación de los materiales compuestos	36
1.4	Fractura de materiales compuestos	42
1.4.1	Introducción a la fractura	42
1.4.2	Patrones y mecanismos de fractura	44

## **Capítulo 2. Maquinado y calidad superficial en los materiales compuestos de matriz polimérica**

2.1	Maquinados en los materiales compuestos de matriz polimérica	49
2.1.1	Maquinado en fibra de vidrio	52
2.1.2	Maquinado en fibra de carbono	53
2.2	Calidad superficial	54

2.2.1	Rugosidad	56
2.2.2	Calidad superficial en el fresado de los materiales compuestos	56
2.3	Técnicas y métodos para medir la rugosidad	58
2.4	Parámetros de rugosidad	61

### **Capítulo 3. Antecedentes, motivación, hipótesis y objetivos**

3.1	Maquinado de compósitos reforzados con fibra de vidrio	63
3.2	Maquinado de compósitos reforzados con fibra de carbono	65
3.3	Motivación	67
3.4	Hipótesis	68
3.5	Objetivo general	68
3.6	Objetivos específicos	68

### **Capítulo 4. Procedimiento experimental**

4.1	Materiales a utilizar	69
4.2	Preparación de probetas de fibra de vidrio y carbono	70
4.3	Herramientas para realizar el maquinado	74
4.4	Procedimiento de maquinado	75
4.5	Técnicas instrumentales	77

## **Capítulo 5. Resultados y discusión**

5.1	Rugosimetría	79
5.1.1	Rugosidad de las superficies maquinadas de las muestras de compuestos reforzados con fibra de vidrio	81
5.1.2	Rugosidad de las superficies maquinadas de las muestras de compuestos reforzados con fibra de carbono	85
5.2	Análisis del daño superficial	90
5.2.1	Proceso de fresado	90
5.2.2	Proceso de corte con disco de diamante policristalino	99
5.3	Comparación de procesos de maquinado en los materiales compuestos reforzados de fibra de vidrio – fibra de carbono	106
5.3.1	Proceso de fresado	106
5.3.2	Proceso de corte con disco de diamante policristalino	106
5.4	Comparación fractográfica entre las superficies obtenidas por fractura en flexión tres puntos y las superficies maquinadas en muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono	107

## **Capítulo 6. Conclusiones**

6.1	Conclusiones	113
6.2	Proceso de fresado	114
6.3	Proceso de corte con disco de diamante policristalino	115
6.4	Análisis del daño superficial	115
6.5	Trabajo a futuro	116

<b>Referencias</b>	117
<b>Apéndice A</b>	125
<b>Apéndice B</b>	126
<b>Apéndice C</b>	129
<b>Lista de figuras</b>	133
<b>Lista de tablas</b>	140

## Resumen

En este trabajo de investigación se estudió el proceso de maquinado de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, poniendo énfasis en los aspectos físicos que determinan la calidad superficial, expresada a través de parámetros de rugosidad. Los materiales compuestos utilizados para esta investigación son la resina epóxica como matriz del material compuesto, fibras de vidrio (ES/EH84) y fibras de carbono (T700) utilizadas como refuerzos, las cuales fueron añadidas de forma direccionada teniendo un diámetro de fibra aproximado de 9  $\mu\text{m}$  para la fibra de vidrio y 7  $\mu\text{m}$  para la fibra de carbono. Se fabricaron probetas en los dos materiales propuestos para ser maquinadas usando una fresadora y una cortadora automáticas. En el proceso de fresado, se utilizaron dos sentidos de avance, los cuales se clasifican en positivo (sentido 1) y negativo (sentido 2). El proceso de maquinado para ambos materiales se realizó a temperatura ambiente y para la cortadora automática se realizó el corte utilizando agua como refrigerante. Posteriormente, se utilizó un rugosímetro convencional para analizar las superficies maquinadas revelando rugosidades en el proceso de fresado en fibra de vidrio entre 0.8  $\mu\text{m}$  - 2.2  $\mu\text{m}$ , obteniendo mejores resultados de calidad superficial al aplicarlo en el sentido negativo, mientras que para la fibra de carbono se obtiene una rugosidad promedio entre 0.2  $\mu\text{m}$  - 1.6  $\mu\text{m}$  obteniendo mejores resultados al maquinar en sentido positivo. Para la cortadora de disco automática, se presentó una rugosidad promedio en las probetas de fibra de vidrio entre 0.1  $\mu\text{m}$  - 0.4  $\mu\text{m}$  mientras que para la fibra de carbono presentó un promedio de 0.1  $\mu\text{m}$  - 0.2  $\mu\text{m}$ . La rugosidad de las muestras está a un 10% del diámetro de la fibra mostrando así una excelente calidad superficial. En el análisis estadístico se demostró que para las altas rugosidades medidas en el proceso de fresado arrojó una tendencia simétrica positiva mientras en el proceso de corte se obtuvieron simetrías positivas - estándar demostrando su bajo daño superficial.

Una vez obtenida esta información, se prosiguió a realizar el estudio del daño superficial producido por el maquinado mediante Microscopía Electrónica de Barrido, el cual reveló la existencia de diversos patrones de fractura tal como debonding, pull-out, marcas de río en la resina, propagaciones interlaminares, nucleación y propagación de grietas en la resina en forma transversal, evidenciando así el efecto que produce el proceso de maquinado al generar un daño superficial controlado equivalente a una fractura localizada

## Introducción

Un material compuesto es la combinación macroscópica de dos o más materiales teniendo así, propiedades superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado [1]. Estos materiales, son heterogéneos y algunos se encuentran en la naturaleza, siendo la madera un ejemplo. Los materiales compuestos desarrollados por el hombre poseen una alta resistencia o rigidez en relación al peso, generando aplicaciones estructurales de alto rendimiento. Usualmente los materiales compuestos también se usan en el mejoramiento de propiedades eléctricas, térmicas, tribológicas y en aplicaciones ambientales debido a su peso ligero, alta resistencia, alta rigidez, buena resistencia a la fatiga y buena resistencia a la corrosión. Con los materiales compuestos, se puede tener una disminución de costos al momento de realizar el ensamble de las piezas, gracias a que en él se puede obtener de manera total una pieza o por partes separadas, teniendo la opción de unirlos mediante los diversos procesos de adhesión [2].

Las primeras aplicaciones comerciales a gran escala comenzaron durante la Segunda Guerra Mundial (1940 - 1950) con aplicaciones militares marinas, pero hoy en día, estas aplicaciones han sido explotadas a nivel industrial, incluyendo el sector aeroespacial, automovilístico, marino, artículos deportivos [3]. En los últimos años, las aplicaciones de los materiales compuestos se han diversificado, como se puede observar en la figura 1, donde se ha comenzado a reemplazar los materiales comunes por estos materiales, como es el caso del Boeing 787 en donde el 50% del avión está fabricado con materiales compuestos, aluminio 20%, titanio 15%, acero 10%, otros materiales 5% [2].

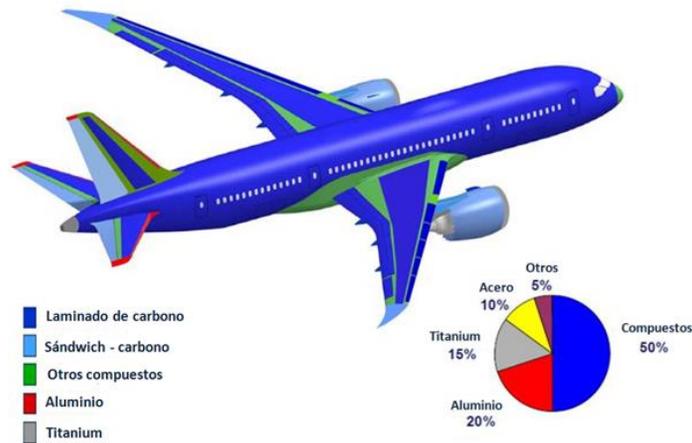


Figura 1. Boeing 787 fabricado con 50% de materiales compuestos [2].

La industria de manufactura aeronáutica y aeroespacial mexicana es joven y dinámica, puede decirse que nació a inicios de este siglo y que, en promedio, ha crecido 20% anualmente, siendo nuestro país el quinceavo productor más grande del mundo. En el 2010 las exportaciones de la industria fueron de tres mil 266 millones de dólares, con una balanza comercial superavitaria de más de 401 millones de dólares. Para el 2011, el monto de exportaciones mexicanas ascendió a 4,337 millones de dólares, logrando un saldo a favor de 555 mdd. De acuerdo al estudio de AeroStrategy (2009), el valor del mercado mundial aeroespacial ascendía a 450 mil millones de dólares en 2008. Poco menos de la mitad corresponde a las ventas de productos estadounidenses (45% del valor mundial). Los otros cuatro productores más importantes son Francia, Reino Unido, Alemania y Canadá. En la escena mundial están creciendo países como China, Brasil, India, Singapur y México que, en su conjunto, representan el 7% de la industria global en ventas [4]. Dada la importancia de los materiales compuestos en la industria, es evidente que se necesita desarrollar tecnología, conocimiento y recursos humanos especializados en nuestro país.

Un punto importante en los materiales compuestos, es la manufactura, la cual se lleva a cabo mediante diversas técnicas de maquinado como son el torneado, el fresado, el taladrado, etc. Presentando características de fallas en el material resaltando la delaminación, el cual consiste en la separación de las fibras de la resina y se produce

mediante una fractura (tensión – compresión – flexión). El término calidad superficial ha sido descrito como (Griffith, 2001): La condición inherente o mejorada de una superficie producida en un maquinado u otra operación de generación de superficie ó “valor” topográfico, mecánico, químico y metalúrgico de una superficie generalmente manufacturada y su relación al desempeño funcional [5,6]. Esta calidad superficial viene representada mediante la rugosidad presente en el material después del maquinado o la fractura y forma un criterio sumamente importante para evaluar un producto.

Dentro de los efectos que puede tener el incumplimiento de la rugosidad en la superficie de una pieza maquinada se pueden mencionar problemas de interferencia entre piezas, provocando efectos de desgaste.

La precisión de una pieza maquinada es un aspecto fundamental para garantizar la funcionalidad del sistema en el que será integrada. Actualmente la industria, sobre todo la automotriz y la aeroespacial requieren que las máquinas sean cada vez más revolucionadas es decir, con más velocidad, por lo que el rango de las tolerancias se ha recortado. Estas tolerancias también se reducen en la medida que se fabrican piezas cada vez de menor tamaño como los productos y sistemas que utilizan la nanotecnología.

Debido a esto, la calidad de las superficies maquinadas es de gran importancia para satisfacer los incrementos en la demanda del desempeño, durabilidad, y confiabilidad de las componentes sofisticadas.

Actualmente se ha incrementado el uso de los materiales compuestos aumentando así la problemática en el diseño de dichos materiales bajo las condiciones específicas de manufacturas ya que día a día se requieren de maquinaria mucho más veloz para realizar dicho corte en ellos aumentando la exigencia de la calidad superficial de dicho material. De acuerdo al estado del arte, existen investigaciones, modelos y simulaciones

que describen su desempeño funcional quedando en evidencia grandes áreas de oportunidad. El análisis superficial y los factores físicos que afectan el maquinado de un material compuesto polimérico, actualmente no está bien explorada, motivo por el cual las referencias son escasas. Dentro de la industria manufacturera, existe un gran déficit de especialistas en los aspectos científicos y tecnológicos de estos materiales.

Esta investigación está dirigida hacia el análisis físico y la evaluación del daño producido por el maquinado en probetas de material compuesto, usando dos herramientas y variando los parámetros de maquinado. El trabajo se estructura en seis capítulos; el capítulo uno describe las generalidades de los materiales compuestos teniendo un enfoque hacia la matriz polimérica. En el capítulo dos se incluyen las diferentes herramientas utilizadas para lograr un maquinado y sus principales características existentes dentro del acabado superficial, como también, se detallara los trabajos existentes en relación a la calidad superficial y maquinada de los materiales. En el capítulo tres, se propone la motivación, hipótesis y objetivos de este tema de tesis, partiendo de los trabajos ya existentes y de la falta de resultados pertinentes en el estudio de estos materiales. En el capítulo cuatro, se explican los materiales utilizados, su elaboración y la manera por la cual se llevó a cabo la experimentación. El capítulo cinco, contiene los resultados de la experimentación, realizando un análisis comparativo con las probetas estudiadas. El capítulo seis contiene las conclusiones de los resultados obtenidos en las probetas. El capítulo siete mostrará las recomendaciones para los futuros trabajos.

# Capítulo 1. Materiales compuestos de matriz polimérica

## 1.1 Introducción y clasificación de los materiales compuestos

Generalmente los materiales compuestos están formados por dos fases; una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo. Normalmente el refuerzo proporciona las propiedades mecánicas al material compuesto y la matriz la resistencia térmica y ambiental (Figura 2), entre otras.

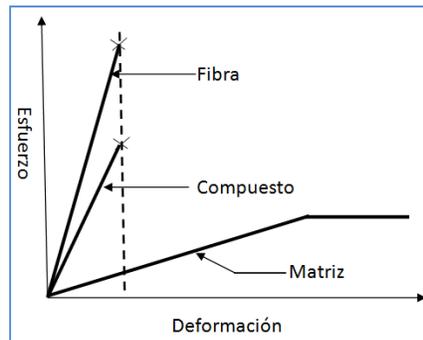


Figura 2.- Deformación de los constituyentes por separado de un material compuesto.

La matriz de un material compuesto, generalmente puede ser reforzada por partículas o fibras. Estos materiales se han dividido en tres grandes grupos, que son: compuestos de matriz metálica (CMM), compuestos de matriz cerámica (CMC) y compuestos de matriz polimérica (CMP).

Los compuestos en matriz metálica (CMM), son aquellos que incluyen mezclas de cerámicos y metales como los carburos cementados, así como el aluminio o magnesio reforzado con fibras fuertes de alta rigidez. Estos compuestos presentan algunas ventajas como una mayor duración, una elevada conductividad térmica y eléctrica, no absorben humedad, buena resistencia al desgaste junto a una buena rigidez y tenacidad a la fractura. Como desventajas, este tipo de matrices están limitadas por su alta densidad y su dificultad de procesado y mecanizado, como también se pueden incluir la posible reactividad entre la matriz y el refuerzo [7]. Un ejemplo claro de esta matriz se

presenta en la industria automotriz, donde la Honda produce actualmente el monoblock del Prelude a partir de una aleación de aluminio con silicio y además con insertos de un CMM de aluminio reforzado con partículas de grafito y óxido de aluminio en la zona del cilindro, el cual ha sustituido las tradicionales fundiciones de hierro, por lo que el ahorro total en peso de este monoblock se ubica cercano a los 40 kg, lo cual reditúa en un ahorro considerable en cuanto a consumo de combustible (ver figura 3).



*Figura 3 .- Honda Prelude 2012, monoblock diseñado con un CMM de aluminio reforzado con partículas de grafito y óxido de aluminio en la zona del cilindro*

Los materiales compuestos en matriz cerámica (CMC) se utilizan mayormente en la industria de la construcción, como también en el diseño de herramientas de corte teniendo como sus principales materiales la alúmina, carburo de silicio (ver figura 4) y nitruro de silicio como matriz a la cual pueden incorporarse con fibras para mejorar sus propiedades, especialmente en aplicaciones de alta temperatura. Sus ventajas son que ofrecen una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y en altas temperaturas presentan altas resistencias a compresión, soportan una humedad extrema y garantiza un coeficiente de fricción estable. Como desventaja presenta una tenacidad muy baja, al igual que sus conductividades térmica y eléctrica, no presenta una alta resistencia a la tracción, por lo que lo más común es añadir fibras con alta resistencia a tracción.



*Figura 4.- Discos de freno en automóviles diseñado en material compuesto con matriz cerámica de carburo de silicio reforzada con fibras de carbono*

Los compuestos en matriz polimérica (CMP) se basan en combinar las buenas propiedades de los polímeros tales como la resistencia a la oxidación, bajo peso y ductilidad, con la alta resistencia mecánica y la rigidez de las fibras que se les agregan. Sus principales desventajas son que las propiedades de muchos de ellos son anisotrópicas, es decir, cambian en función de la dirección en la cual se miden, también estas matrices son susceptibles al ataque de agentes químicos o solventes, así como a la radiación UV; además, algunos de los métodos de manufactura para su conformado son lentos y costosos (ver figura 5).

Otro factor importante que se debe tomar en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de matrices, es la influencia que tienen las condiciones ambientales sobre los polímeros, tales como humedad, temperatura y radiación lo cual puede afectar severamente en la conformación del compuesto.



*Figura 5.- Automóvil deportivo BMW m3 2013, utilizando fibra de carbono en los techos.*

Una vez discutidos los principales materiales compuestos, a continuación se enlistaran una serie de características generales que se deberán analizar para la selección de la matriz:

- Los compuestos que trabajen a una temperatura menor a 200 °C, generalmente usan como matriz un polímero.
- Los compuestos que trabajen a temperaturas mayores, usualmente usan como matriz un metal
- A temperaturas altas los compuestos cerámicos tienen un uso potencial.

Con los materiales compuestos se pueden lograr diseños fuertes, rígidos y de peso muy ligero obteniendo relaciones de resistencia - peso varias veces mayores que las del acero o aluminio. Estas propiedades son altamente apreciadas en aplicaciones que van desde la aviación hasta los equipos de deportes.

Estos materiales compuestos, generalmente son reforzados en formas de partículas o en fibras como se muestra en la figura 6, el cual, en el caso de las partículas se orientan en forma aleatoria para darle las propiedades mecánicas necesarias al material para cumplir una función específica. En el caso de los reforzados por fibras, se dividen en laminados, la cual, a su vez se pueden formar a través de fibras continuas o discontinuas (cortas) orientadas en forma unidireccional, entrecruzada o aleatoria.

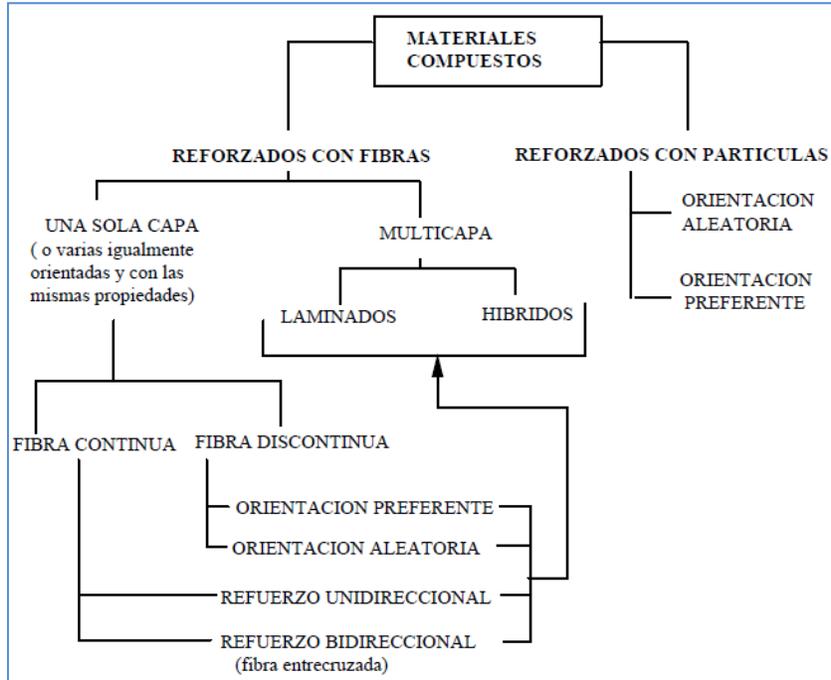


Figura 6.- Clasificación de los materiales compuestos [9].

### Compuestos particulados

Los compuestos particulados (figura 7) son aquellos en los cuales el refuerzo en la matriz está en forma de partículas. Estos materiales se dividen en compuestos de partículas grandes y en compuestos endurecidos por dispersión. Las partículas grandes son de tamaño mayor a un micrómetro ( $>1\mu\text{m}$ ). Los reforzados con partículas dispersas son aquellas en la cual el diámetro de la partícula es menor a un micrómetro de diámetro ( $<1\mu\text{m}$ ).

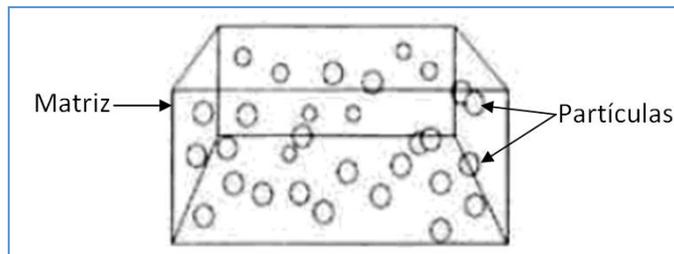


Figura 7.- Compuesto particulado [10]

## Compuestos Fibrosos

En la figura 8 se muestra una clasificación de los materiales compuestos reforzados por fibras. Estos refuerzos normalmente están constituidos o fabricados en forma de fibras continuas y alineadas, en fibras discontinuas alineadas y orientadas aleatoriamente, como también en forma laminar obteniendo una orientación preferente o aleatoria según las necesidades en las aplicaciones industriales. Sus propiedades mecánicas son altas ya que la matriz transmite la fuerza a las fibras otorgando al compuesto ductilidad y tenacidad.

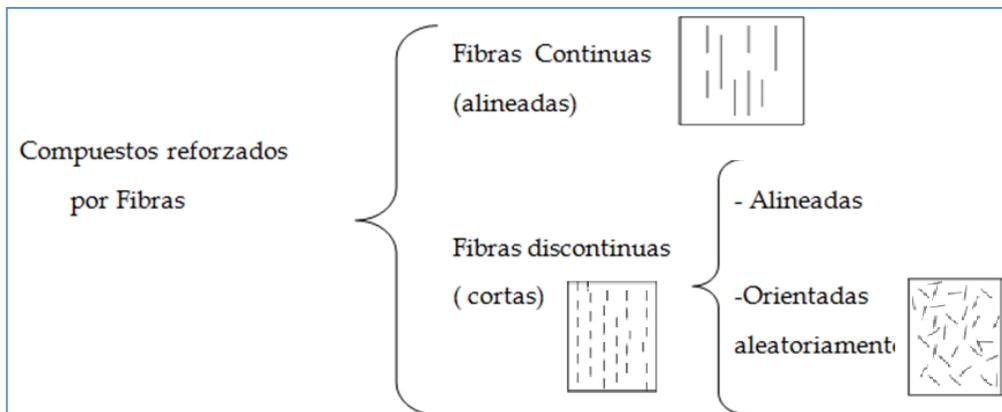


Figura 8 .- compuestos reforzados por fibras

En estos materiales las características mecánicas se pueden calcular con ayuda de la regla de las mezclas detallada en la ecuación 1, así por ejemplo, se puede calcular su densidad:

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\rho_c$ , la densidad del compuesto.

$f_m$ , la fracción volumétrica de la matriz.

$\rho_m$ , la densidad de la matriz.

$f_f$ , la fracción volumétrica de las fibras

$\rho_f$ , la densidad de las fibras.

Las fibras discontinuas y al azar, se utilizan cuando las fibras están sometidas a esfuerzos totalmente multidireccionales y con frecuencia se comparan con los materiales reforzados con partículas.

El compuesto laminado mostrado en la figura 9, está constituido por un apilamiento de láminas paralelas, en donde se puede diferenciar entre:

- Unidireccional.- Cuando todas las fibras están paralelas
- Bidireccional.- Cuando la mitad de las fibras están orientadas en ángulo recto con respecto a la otra mitad.
- Multidireccional.- El material es isotrópico.

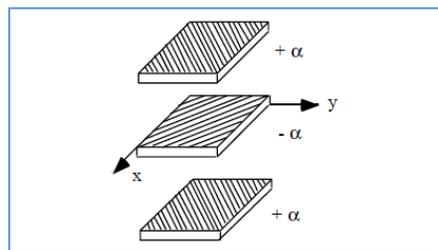


Figura 9.- Apilamiento simétrico en un laminado [9].

Las propiedades de cada lamina dependen de los factores como son la naturaleza de la fibra, presentación (roving, mat, etc) y porcentaje de la fibra y la orientación del apilamiento. También, estos materiales se ven afectados bajo los factores de rigidez, orientación y espesor de la lámina, la secuencia de apilado y la temperatura de curado.

## **1.2 Materiales compuestos de matriz polimérica reforzadas con fibras de vidrio y carbono**

### **1.2.1 Matrices poliméricas**

Los materiales compuestos de matriz polimérica están formados por pliegues o laminas por lo que están sustituyendo con éxito los materiales tradicionales, brindando grandes beneficios a la industria manufacturera, gracias a su alta relación resistencia - peso, elevada rigidez, resistencia a la corrosión, fatiga, abrasión, costos de mantenimiento mínimo, facilidad de transporte e instalación hacen que sea un material muy útil ya que con estas propiedades mecánicas lo hacen atractivo en casi todos los campos de ingeniería aplicada, que van desde la industria aeroespacial, automotriz, artículos deportivos, productos para la construcción, prótesis, hasta los bienes de consumo [11, 12, 13]. Esto se traduce en ahorro de combustible y reducción de emisiones. Para producir los mismos, en muchas ocasiones se deberán utilizar el maquinado, generando superficies de corte la cual deberán de ser de una alta calidad, incluyendo la precisión dimensional.

El primer ejemplo comercial del uso de materiales compuestos con matriz polimérica fue aplicado a partes automotrices, cuando la Toyota Motor Company en 1991 aplicó el nylon 6 para incorporarlo en las cubiertas de las bandas de tiempo de los motores de combustión interna. General Motors también ha usado los CMP en algunas partes de las puertas en su línea de vehículos como el Impala y la M-Van, obteniendo una reducción en peso importante por usar una matriz de polímero, además de una menor sección transversal, debido a una mayor resistencia del compuesto. Recientemente, las líneas de conducción de combustible en el automóvil Honda Acura han sido una muestra más de aplicación de materiales compuestos de matriz polimérica, ya que se han manufacturado a partir de una matriz reforzada con fibras de nylon 12, el cual es más ligero y más resistente a la corrosión, comparado con el aluminio que se usaba anteriormente para fabricar estas tuberías [14, 15]. Para comprender la función de los

materiales compuesto es importante conocer la función de cada componente en el conjunto.

La función de la matriz es envolver y transferir la carga de unas fibras a otras, mantener su alineación y proteger a las fibras del deterioro mecánico (golpes) y químico (ambiente, sustancias agresivas) para evitar la propagación de fisuras en el soporte. Las fibras, por su parte, aportan la resistencia a la tensión requerida frente a un esfuerzo de tensión, como también, rigidez (elevado módulo elástico), resistencia a la tensión, conductividad o aislamiento eléctrico dependiendo del tipo de fibra, entre otros parámetros (figura 10).

Las fibras solas sometidas a compresión no soportan ninguna carga, produciéndose micropandeo. La matriz hace un soporte lateral elástico, impidiendo este modo de falla. Para conseguir esta sustentación lateral de las fibras, se precisa un alto módulo elástico de la matriz. La humedad absorbida por la matriz, y la temperatura, disminuyen el módulo elástico, siendo esta disminución muy brusca a partir de la temperatura de transición vítrea, que impone la temperatura máxima de servicio del material.

Con matrices frágiles, golpes de baja energía, en laminados de matriz polimérica reforzados con fibras, provocan delaminaciones que hacen que la resistencia a la compresión del laminado disminuya hasta un 30% [15].



Figura 10.- Manera de formar un compuesto polimérico a base de fibras [3].

Las resinas son los polímeros más ampliamente usados en los compuestos con matriz de polímero, dando lugar a dos tipos, las resinas termofijas (termoestables) y las resinas

termoplásticas, lo cual (ver figura 11), muestran las principales características internas del material después de aplicarle el curado correspondiente.

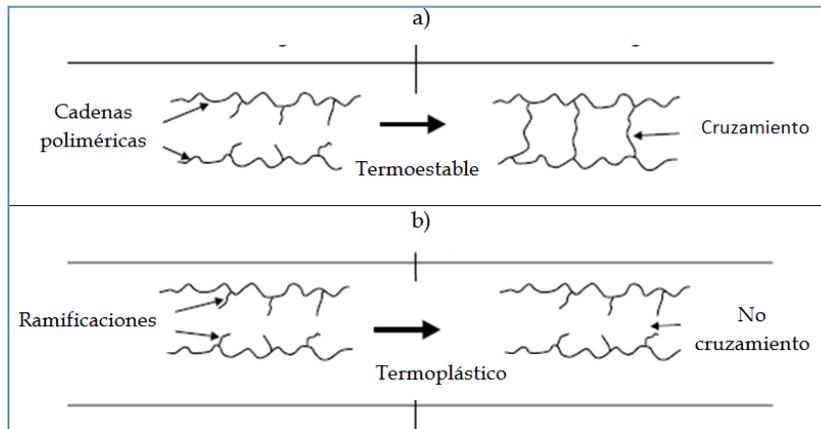


Figura 11.- Comparación de la matriz polimérica termoplástica

### Resinas termoestables

Estas resinas sufren una serie de reacciones químicas, llamadas proceso de curado, la cual hace que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse ya que al someterlo a una temperatura elevada la resina tenderá a degradarse (hasta 300° C para las epoxi y 110 para las de poliéster). Una ventaja importante en el uso de esta resina es su peso molecular, ya que como es bajo, puede llegar a hacer un procedimiento fácil al momento de formar una pieza, antes de pasar al proceso del curado [16].

Algunos ejemplos para este tipo de polímeros son la resina poliéster, resinas epoxi, fenólicas, etc.

### Resinas de poliéster insaturado

Desde su descubrimiento en 1936, hasta la actualidad, esta resina ha ganado terreno hasta por un 75% del total de las resinas utilizadas en el mercado de los materiales compuestos de matriz termoestable. Compatibles sólo con materiales de fibra de vidrio,

las resinas polyester tienen un uso exclusivo para el recubrimiento de láminas, para juntas y reparaciones debido a la facilidad con que se rompen.

Esta resina es más adecuada para construir objetos ligeros, la principal ventaja de la resina polyester es la estabilidad mecánica, química y eléctrica de sus propiedades, su bajo costo como también lo son el tiempo de curado ya que varía de entre 6 a 8 horas (incluso a temperatura ambiente) con un tiempo de trabajo de 20 a 30 minutos. El proceso de curado parte de tres secciones las cuales inicia con la gelación, en la que la resina cambia de un líquido a un gel. La segunda es el endurecimiento, donde la resina cambia de un gel blanco a un material endurecido que se puede extraer del molde y por último el curado final, en donde la resina adquiere completamente sus propiedades mecánicas y químicas

Como principal inconveniente se puede mencionar que tienden a contraerse durante el endurecimiento (7% en volumen). Usualmente se utilizan en procesos de pultrusion, filament winding, SMC, RTM y hand layup. En la Tabla 1 se reportan algunas propiedades de éstas [15].

**Tabla 1. Propiedades de la resina poliéster [1]**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.1-1.4
Resistencia a tensión MPa	35-95
Módulo de tensión GPa	1.6-4.1
Resistencia a flexión MPa	80-130
Módulo de flexión MPa	3.45- 3.6
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	80-100

## Resinas epóxicas

Es un tipo de resina muy versátil ya que posee un gran rango de propiedades. Su gran adherencia (13.8 MPa frente a la resina polyester con 0.7 MPa) en todo tipo de soportes hace que sea un producto ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones aeroespaciales [17]. Las resinas epóxicas tienen como características físicas muy buena resistencia al impacto, excelentes propiedades de tenacidad, buena transferencia de carga cuando son reforzadas con fibras, el grado de contracción durante el curado es bajo y su resistencia térmica es elevada, la vida útil para la resina epóxica es de un mínimo de dos años, y por lo general son curadas en autoclave para mejorar las propiedades mecánicas, ver Tabla 2.

**Tabla 2. Propiedades de resina epóxica [1]**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.30
Resistencia a tensión MPa	83
Módulo de tensión GPa	4.1
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	120-180

## Resinas termoplásticas

Las matrices termoplásticas son polímeros que al calentarse a determinadas temperaturas se convierten en fluidos, permitiendo su moldeabilidad en la forma deseada que quedara fijada al enfriarse, siendo todo ello reversible. Constituyen el grupo más importante y de mayor uso comercial, suelen emplearse como refuerzo fibras de vidrio, carbono, boro, etc. Algunos ejemplos son el polipropileno, poliamida, polietileno.

Comúnmente, estas resinas son utilizadas en aplicaciones donde no se vayan a producir incrementos de temperatura importantes. Suelen ser reforzados con fibras cortas y en

cualquier caso donde sus aplicaciones son de baja exigencia en cuanto a resistencia, dado que sus propiedades mecánicas son muy inferiores a las de las resinas epoxica. Presenta como ventajas una buena resistencia química, baja absorción de humedad, buenas propiedades mecánicas, velocidad de producción elevada debido a la menor duración del ciclo de moldeo, las piezas se pueden reparar fácilmente al reblandecer las piezas por efecto del calor y unir las partes. Se pueden reciclar, admiten el almacenamiento ilimitado frente a las termoestables que deben almacenarse en condiciones controladas de temperatura y humedad.

Como desventajas, para tener buenas propiedades mecánicas el peso molecular debe ser elevado y por lo tanto, la viscosidad también. Esto da lugar a que la impregnación de las fibras sea difícil. Requieren temperaturas y presiones elevadas para su moldeo. A pesar de sus desventajas, en la actualidad las matrices termoplásticas están sustituyendo a las termoestables debido sobre todo a su alto grado de reciclaje.

Algunos tipos de resinas termoplásticas son las resinas de polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), policarbonato, etc.

### **1.2.2 Refuerzos para matrices poliméricas**

Los refuerzos tienen como función principal dentro del compuesto de transmitir las cargas hacia la matriz, por lo tanto define la mayor parte de las características mecánicas del material como la resistencia y la rigidez. Puede suponer un porcentaje entre 20-80% en volumen del material compuesto y puede estar formado por fibras de vidrio, carbono, Kevlar, polietileno, etc (ver tabla 3). Las fibras son el refuerzo más utilizado en los materiales compuestos de matriz polimérica por lo cual, a continuación se detallarán las fibras más utilizadas dentro del campo manufacturero.

**Tabla 3. Propiedades fibra de vidrio - carbono - convencionales [3].**

Material	Díametro (µm)	Densidad (ρ) (g/cm³)	Módulo tensión (E) (GPa)	Resistencia a la tensión (σ) (GPa)	Módulo específico (E/ρ)	Resistencia específica	Punto de fusión (°C)	% elongación a la fractura
E-glass	7	2.54	70	3.45	27	1.35	1540	4.8
S-glass	15	2.50	86	4.50	34.5	1.8	1540	5.7
Grafito de alto módulo	7.5	1.9	400	1.8	200	0.9	>3500	1.5
Grafito de alta resistencia	7.5	1.7	240	2.6	140	1.5	>3500	0.8
Acero		7.8	208	0.34-2.1	27	0.04-0.027	1480	5-25
Aleaciones Al		2.7	69	0.14-0.62	26	0.05-0.23	600	8-16

### 1.2.2.1 Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio constituyen el refuerzo utilizado de forma mayoritaria porque reducen la tasa de expansión, incrementan el módulo de elasticidad, tienen características buenas como su alta rigidez, durabilidad y resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión, y por su bajo precio. Existen varios tipos que se diferencian en su composición química y que por lo tanto presentan las diferentes propiedades mostradas en la Tabla 4:

- E (electric) (vidrio-E): es el más usado por sus buenas propiedades de resistencia, rigidez, eléctricas, y de desgaste/precio.
- R (resistance) y S (strength): destaca por sus buenas propiedades mecánicas.

- C (chemical): destaca por su buena resistencia química (corrosión). Se puede utilizar en las capas superficiales de estructuras sometidas a atmósferas agresivas.

**Tabla 4.- Composiciones de los diferentes vidrios usados en la fabricación de fibras [9]**

	<b>Vidrio E</b>	<b>Vidrio C</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	52.4	64.4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.4	4.1
<b>CaO</b>	17.2	13.4
<b>MgO</b>	4.6	3.3
<b>Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub></b>	0.8	9.6
<b>Ba<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10.6	4.7
<b>BaO</b>	-	0.9

En la figura 12, se puede observar un esquema de la fabricación de la fibra de vidrio, la cual, se lleva a cabo a partir del vidrio fundido, para después, hacerlo pasar por hileras de gravedad a una determinada temperatura y son estiradas en caliente por bobinado a alta velocidad. El diámetro de las fibras de vidrio varía entre 8 y 15  $\mu\text{m}$ , teniendo una resistencia a la rotura condicionada por el daño superficial que pueden sufrir al rozar entre sí durante su manipulación. Para esto, la fibra se recubre con un material denominado ensimaje que protege la superficie del deterioro por fricción o abrasión y facilita la unión entre la fibra y la matriz.

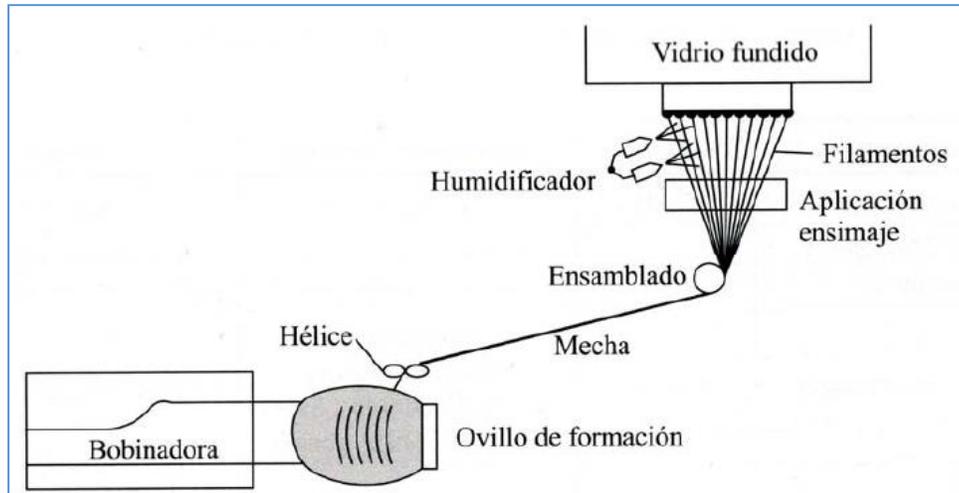


Figura 12.- Fabricación de la fibra de vidrio [18]

Existen varios tipos de presentaciones por la cual se puede adquirir la fibra de vidrio, la cual se dividen en roving, mat de hilos cortados, mat de hilos continuos y tejido (ver figura 13).

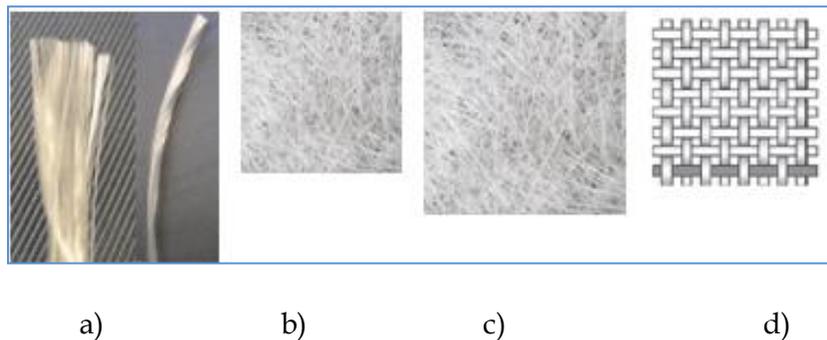


Figura 13.-Presentación de la fibra de vidrio en el mercado. a) **Roving**: bobina de hilos continuos (conjunto de filamentos) b) **Mat de hilos cortados**: fieltros de hilos cortados y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. c) **Mat de hilos continuos**: fieltro de hilos continuos y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Permite un alargamiento. d) **Tejido**: formados por conjuntos de hilos entrelazados en dos direcciones.

La figura 14 muestra una de las muchas aplicaciones industriales utilizando fibras de vidrio, la cual podrán ser encontradas desde la industria de la construcción de barcos y botes, como también en piezas de automóviles, etc.



*Figura 14.- Construcción de una lancha con material de fibra de vidrio.*

### **1.2.2.2 Fibra de carbono**

Las fibras de carbono se caracterizan por tener excelentes propiedades como peso ligero, alta resistencia y alta rigidez. Estas propiedades las hacen especialmente atractivas para aplicaciones aeroespaciales [19, 20, 21]. Estos factores se traducen en un mejor rendimiento, ahorro de combustible y reducción de emisiones. Sin embargo, su inclusión en los vehículos de producción de alto volumen es algo limitada, debido a la baja producción y los costos de procesamiento asociados con los métodos convencionales (es decir, autoclave) de fabricación de componentes de material compuesto [22]. Las fibras son frágiles y muestran una recuperación elástica del 100% cuando se someten a esfuerzos inferiores a los de rotura. Sus propiedades transversales de las fibras son muy inferiores a las longitudinales.

El tejido de fibras de carbono procede de una mezcla de polímeros, el más utilizado es el PAN (poliacrilonitrilo), que normalmente se combina con otros polímeros como el metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato y cloruro de vinilo.

Tomando como base el proceso de fabricación del PAN, se pueden distinguir las siguientes etapas (figura 15):

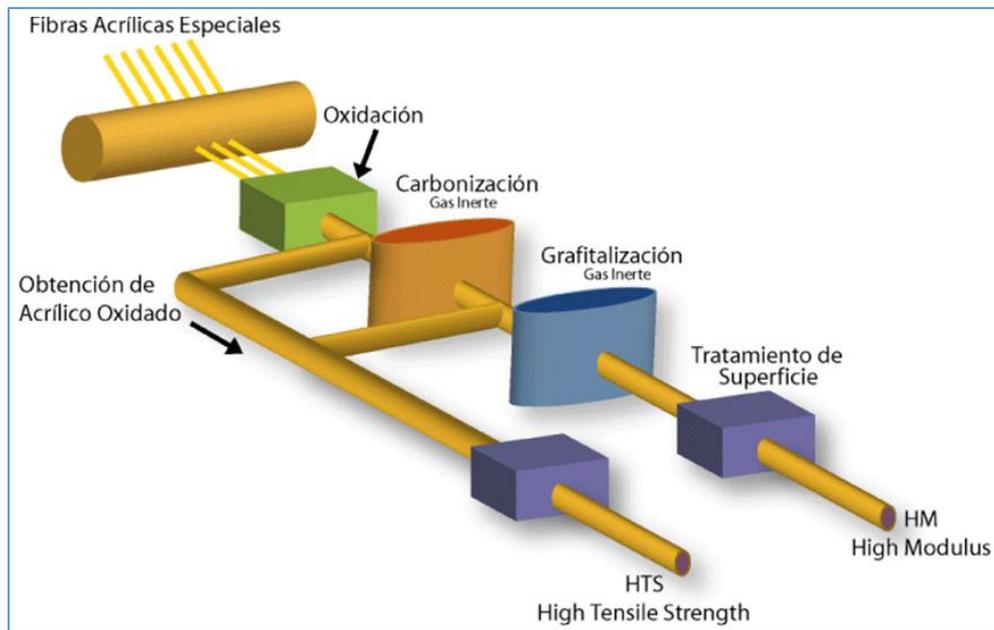


Figura 15.- Método de fabricación de la fibra de carbono.

**Estabilización:** durante esta fase las fibras de PAN se calientan a temperaturas entre los 200°C y 300 °C mientras que son estiradas y alargadas a través de un horno de oxidación, con el fin de darles la orientación molecular requerida para que puedan tener estabilidad dimensional y de esta manera evitar que se fundan en el siguiente proceso.

**Carbonización:** una vez que las fibras han adquirido estabilidad, se calientan a temperaturas superiores a los 1.000 °C bajo una atmósfera inerte, es decir, en la que ningún agente externo interfiere en el proceso. Durante este periodo de calentamiento los anillos hexagonales de carbono puro se orientan a lo largo de toda la longitud del hilo.

**Grafitalización:** es un nuevo tratamiento de calentamiento a temperaturas, por encima de 2000°C, el tamaño de los cristales de carbono aumenta y mejora la orientación de los anillos en la fibra. Cuando más elevada es la temperatura, las fibras obtenidas son de mayor módulo elástico y menor resistencia.

**Tratamiento de superficie:** finalmente, la fibra pasa a través de una cámara donde se le aplica un producto catalizador que promueve la adhesión de la fibra a la resina.

Hasta este punto del proceso se obtiene el producto primario: los filamentos individuales de carbono, también llamados mechas, con un diámetro que varía entre 5 y 8 micras ( $\mu\text{m}$ ), que son trenzados entre sí en grupos de 5,000 y 12,000 mechas y se conocen con el nombre de *roving*.

En la Tabla 5, se muestra la clasificación de los grados de carbono de las fibras, lo cual, se lleva a cabo variando la temperatura de carbonización.

**Tabla 5.- Grados de la fibra de carbono**

<b>Temperatura de Carbonización °C</b>	<b>Hasta 1000</b>	<b>1000 - 1500</b>	<b>1500 - 2000</b>	<b>2000 + Grafitización</b>
Grados de la Fibra de carbono	Bajo módulo	Módulo Standard	Módulo Intermedio	Alto Módulo
Módulos de Elasticidad (GPa)	Hasta 200	200 - 250	250 - 325	325

En la figura 16 se puede observar una aplicación reciente de los compuestos con fibra de carbono dentro del area automotriz, con ellos se pueden disminuir los costos de combustible gracias a su peso ligero ayudando asi al ecosistema con una disminusión considerable respecto a la emisión de CO<sub>2</sub>.



*Figura 16.- Lamborghini creado con un exterior de fibra de carbono sin resina para mejorar el peso del vehículo.*

En la Tabla 6, se muestran algunas de las propiedades mecánicas

**Tabla 6.- Propiedades típicas de materiales fibrosos usados como refuerzo en los compuestos [23]**

Fibra	Diámetro (mm)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Vidrio			
Vidrio - E	0.01	3450	73
Vidrio - S		4480	86
Carbono	0.01	2750	240
Boro	0.14	3100	393
Kevlar 49	0.013	3450	130
Cerámicos Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	1900	380
SiC	0.13	3275	400

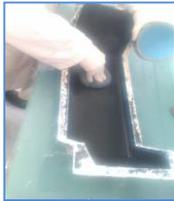
### 1.3 Fabricación de los materiales compuestos

La mayoría de los productos compuestos están hechos utilizando cualquiera de las técnicas de procesamiento estándar, tales como moldeo por compresión, extrusión por estirado, bobinado de filamentos o de moldeo por transferencia de resina [12].

En cualquiera de los múltiples procesos existentes para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras se pueden distinguir dos fases: la configuración del laminado y el curado. La primera incluye con carácter general el conjunto de acciones que es preciso realizar hasta obtener la configuración final del material compuesto.

### **Método de apilado manual (hand lay-up)**

En la figura 17 se muestra el método de apilado manual, el cual consiste en disponer sobre un molde previamente elaborado las fibras que se impregnan de la resina con brocha o rodillo. Se van sucediendo capas de matriz y resina hasta alcanzar el espesor de diseño. Las fibras, cuando se utiliza este procedimiento suelen venir en fieltros enrollados pudiendo estar la fibra dispuesta en una o dos direcciones. En este método, el curado se realiza a temperatura ambiente sin ayuda de presión ni calor. Es usual aplicar este método a materiales compuestos de poliéster y fibra de vidrio con bajos requerimientos estructurales o en geometrías que no permiten una mayor automatización [9].



a)



b)



c)

Figura 17.- Método de apilado manual (hand lay-up). a) Molde b) Fibras a utilizar c) Proceso de apilado manual

### **Método de enrollado de filamentos (filament winding)**

Consiste en pasar hilos o mechas continuas de fibras por un baño de resina enrollándolos a continuación sobre un molde giratorio que dispone del mecanismo adecuado para orientar la fibra con el ángulo de diseño con respecto al eje longitudinal. Este procedimiento se utiliza con los mismos materiales que en el caso anterior y en geometrías de revolución: tubos, depósitos, etc. Permite un mayor control y fiabilidad del producto final que el método manual. La figura 18 muestra un diagrama aproximado de esta técnica.

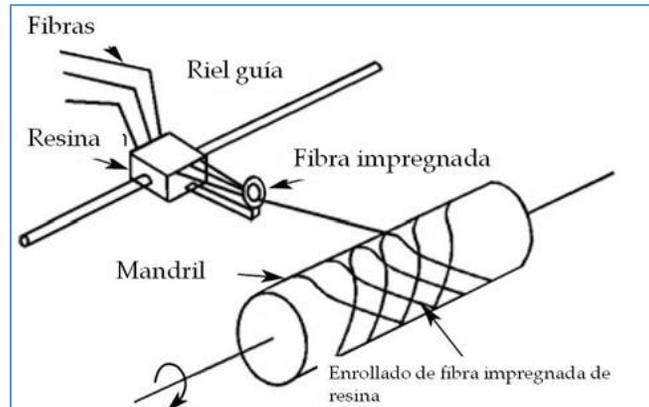


Figura 18. Técnica de enrollado de filamento (Filament winding)[3].

### Método de proyección (Spray-up)

Se usa en el caso de que el refuerzo no sea continuo ni tenga orientación preferente. En este caso se proyectan simultáneamente los hilos ya cortados y la resina a un molde, consolidando el compuesto con el rodillo. Se usa generalmente para compuestos de resina poliéster y fibra corta de vidrio.

Todos los procedimientos indicados se realizan en molde abierto.



Figura 19.- Método de proyección (Spray-up) en molde abierto

Las piezas fabricadas deben pasar un cierto control (inspección visual, rayos X, ultrasonidos y ensayos de resistencia) que permite detectar los principales defectos que pueden presentarse tales como discontinuidades entre láminas producidas por la existencia de aire atrapado, falta de resina o delaminaciones que aparecen durante el curado, curado incompleto de la resina,

exceso de resina entre láminas, porosidad y agujeros en la matriz, orientación incorrecta de las láminas para formar el laminado, daño en las fibras, inclusiones, variaciones en el espesor, uniones inaceptables, etc.

## **Autoclave**

El término pre-impregnado (figura 20) es un paso que se realiza antes de elaborar un material compuesto, el propósito de realizar esto es asegurar que la resina fluya completamente alrededor de las fibras.



*Figura 20.- Fibras pre-impregnado unidireccionales [2]*

Se utiliza el método de bolsa de vacío bajo una presión para después poderlo introducir al autoclave, aunque también se puede partir de las capas de fibras, generalmente unidireccionales, impregnarlas y curarlas parcialmente. Las láminas se colocan en la superficie del molde en el orden de apilamiento y con las direcciones adecuadas para formar un laminado. Se cubren con un saco de presión para introducirlos en el autoclave a temperatura y presión adecuadas para provocar el curado final de la pieza. Esta es la técnica más difundida en materiales compuestos de fibra de carbono y resina epóxica que se utilizan para paneles y elementos de aviones [9]. La figura 21 muestra la preparación de los materiales para usar esta técnica y posteriormente el curado en el autoclave.

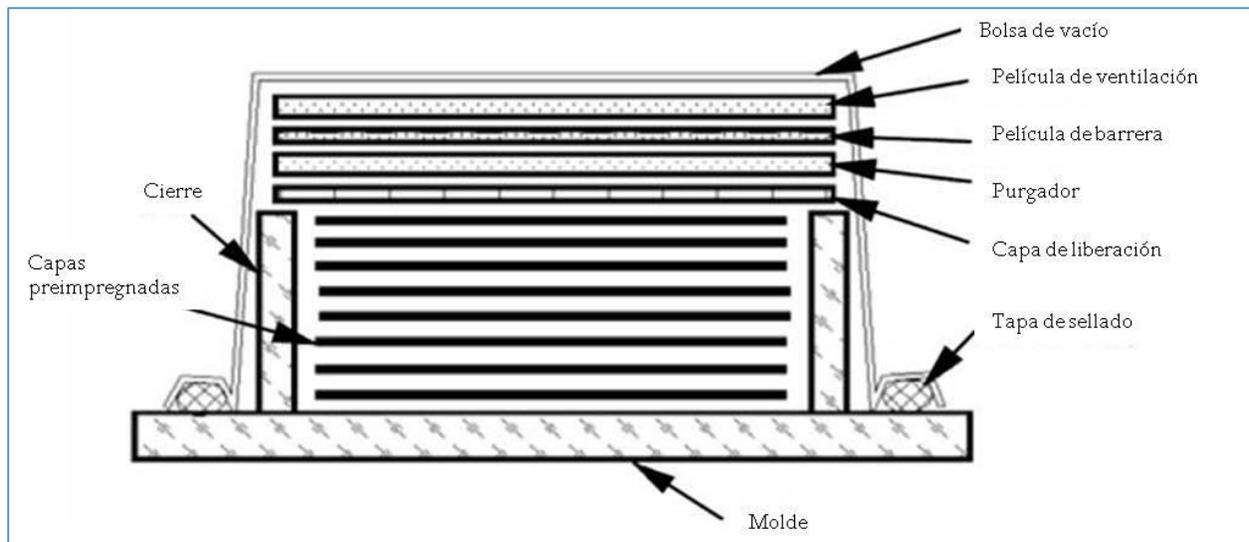


Figura 21.- Preparación para el curado y la consolidación del material [3].

El curado es el proceso de secado o polimerización de la matriz para formar los enlaces permanentes entre la matriz y las fibras en una lámina y a su vez entre las propias láminas. El curado se puede producir de manera natural o puede requerir, para acelerar el proceso de polimerización, la aplicación independiente o combinada de calor y presión en autoclaves, hornos, etc.

Los pasos necesarios en el autoclave de la figura 22 son los siguientes:

1. Una vez teniendo el material en el molde, arriba de éste se coloca una película de liberación perforada (release film) que ayuda a escapar excesos de aire y resina.
2. Instalar el purgador (bleeder) que es una tela porosa, en la parte superior de la película de liberación. La función de esta película es absorber el exceso de resina y humedad que viene de la pila de materiales preimpregnados.
3. Posteriormente se coloca una película de barrera, ésta película es similar a la película de liberación, pero la diferencia es que no está perforada o porosa.

4. La siguiente película es la de ventilación (breather), su función es crear cualquier presión alrededor del material y al mismo tiempo permitir que el aire excedente salga.
5. La última capa es la bolsa de vacío. La película es sellada por todos los lados que alcanzan los materiales pre-impregnados con cinta de sellado, se conecta una válvula en la bolsa de vacío y a una manguera para crear el vacío dentro de todas las capas [3].

La figura 22 muestra un ciclo de curado común en el proceso de autoclave. El vacío es aplicado primero en la bolsa de vacío y después la temperatura comienza a incrementarse a medida que se logre un flujo de resina. El aumento de temperatura es usualmente de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$  a  $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$  hasta llegar a los  $140^{\circ}\text{C}$  dejando el sistema a esa temperatura por dos horas, después se eleva la temperatura a  $170^{\circ}\text{C}$  para el curado del material compuesto, así como también la presión durante dos horas, por último viene el enfriamiento a  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

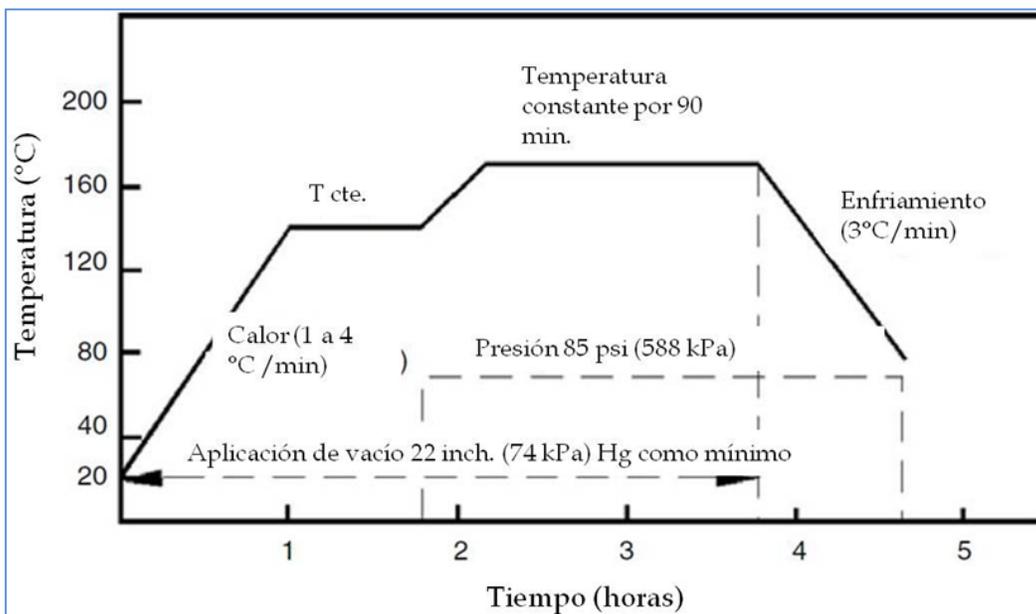


Figura 22.- Ciclo del curado en el proceso de autoclave [3]

## 1.4. Fractura de materiales compuestos

### 1.4.1. Introducción a la fractura

La fractura se puede definir como la separación de un cuerpo en dos o más piezas bajo la acción de una carga, los componentes que rigen la fractura son: la iniciación de la grieta y su propagación, dependiendo del tipo de material en el que se presente la fractura, ésta se considera dúctil ó frágil [24].

#### Fractura dúctil y frágil

El comportamiento general de los materiales bajo carga puede clasificarse como dúctil o frágil dependiendo de si o no el material exhibe la capacidad de someterse a deformación plástica. La figura 23 muestra la curva de esfuerzo-deformación de un material dúctil.

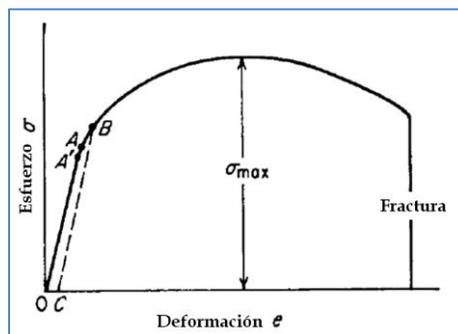
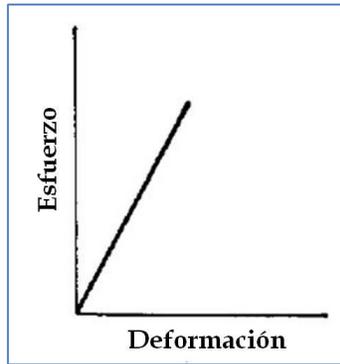


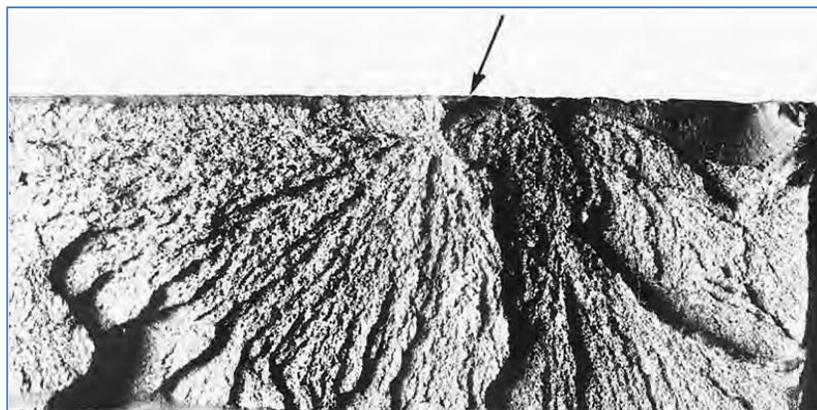
Figura 23. Curva esfuerzo-deformación de un material dúctil, al final de la curva se presenta la fractura del material [24].

Un material completamente frágil se fractura casi en el límite elástico (ver figura 24).



*Figura 24. Curva esfuerzo-deformación para un material completamente frágil [24].*

Una fractura dúctil se caracteriza por una apreciable deformación plástica durante la propagación de las grietas, en cambio las fracturas frágiles, en metales, se caracterizan por la rápida propagación de la grieta, sin ninguna deformación plástica. La fractura dúctil es común en los metales y en los polímeros, la fractura frágil se presenta en cerámicos y algunos metales a bajas temperaturas. La figura 25 muestra una fractura frágil, la superficie presenta un patrón de fractura "V" conocido como líneas de Chevron, la flecha indica el origen de la fractura.



*Figura 25. Fractura frágil de un material metálico que presenta un patrón de líneas de Chevron en su superficie [25]*

### 1.4.2. Patrones y mecanismos de fractura

Existen tres modos de fallo fundamentales en las fracturas de los materiales compuestos:

Modo I: modo de apertura.

Modo II: modo de cizallamiento en el plano.

Modo III: modo de cizallamiento.

En los materiales compuestos la falla en un laminado puede ser causado por la falla de una lámina individual o capas dentro del laminado, este tipo de falla es de tipo intralaminar, cuando existe una separación de láminas o capas contiguas se le conoce como falla interlaminar. Una buena muestra del comportamiento de estos materiales son observaciones sobre los micromecanismos de delaminación, que es la separación de las capas reforzadas con fibras que se apilan juntas para formar laminados, es uno de los mecanismos de fractura más comúnmente observados en materiales compuestos. Las causas más frecuentes de la delaminación están asociados a los materiales utilizados y a las discontinuidades estructurales que dan lugar a tensiones interlaminares.

En los materiales compuestos reforzados con fibras, las fallas longitudinal y transversal a la dirección de las fibras se distinguen, como en la figura 26. El modelo del material para una lámina unidireccional de un compuesto de fibra reforzada consiste en un material elástico ortotrópico lineal, un criterio de fallo que indica el inicio de la respuesta inelástica, y un daño de la determinación de la ley de evolución de la degradación de la rigidez con la carga [26].

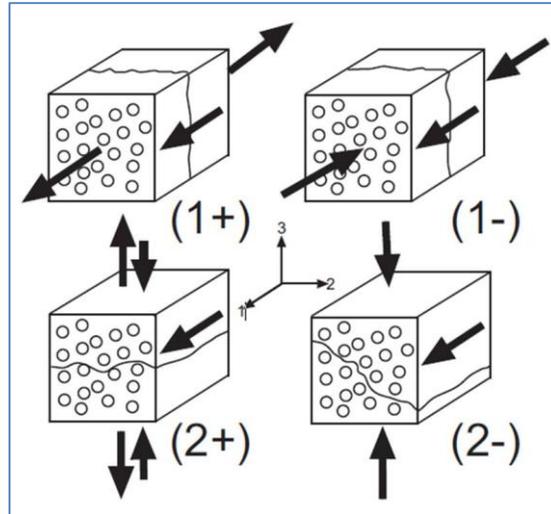


Figura 26. Modos de falla intralaminar: (1+) Tensión longitudinal. (1-) Compresión longitudinal. (2+) Fractura transversal con orientación de fibras  $\alpha_0=0^\circ$ . (2-) Fractura transversal con orientación de fibras  $\alpha_0=53^\circ$  [26].

La falla longitudinal ocurre en el modo de tensión (+1) en la figura 26, debido al rompimiento de la fibra; el desprendimiento y la propagación que se le llama “fiber kinking” ocurre en el modo de compresión (-1) en la figura 26. La falla en la dirección transversal abarca tanto agrietamiento de la matriz y la desunión de fibra-matriz. Cuando la tensión de cizallamiento en el plano es grande en comparación con el esfuerzo de compresión transversal, el plano de fractura es perpendicular al plano medio de la placa (+2) en la figura 26. Sin embargo, el aumento de la tensión transversal a la compresión provoca un cambio en el ángulo del plano de fractura (-2) [26].

Por ahora se conoce que las fracturas translaminares pueden presentar modos de resistencia a la tensión, compresión, cizalladura, flexión y fatiga, mientras que las fracturas intralaminares e interlaminares pueden presentar sobrecarga y fatiga en el modo tensión I, el modo II de cizallamiento, y la combinación de ambos [1].

Desde una perspectiva fractográfica, en una fractura translaminar al final de una fibra fracturada se observa evidencia de las condiciones de falla, es decir, si la fibra ha fallado

en tensión o compresión. En el caso de una falla a tensión como la presentada en la figura 27a, las fibras individuales presentan fracturas radiales en los extremos de las fibras y, a menudo exhiben morfología de mirror o espejo, mist ó difusa y hackles ó fibrosa, lo que proporciona un medio para deducir la dirección local y global de la falla. La fractura en la compresión (fig. 27b) es por lo general a través de micropandeo, lo que conduce a chop marks sobre un lado de los extremos de las fibras fracturadas y los patrones radiales en la otra [27].

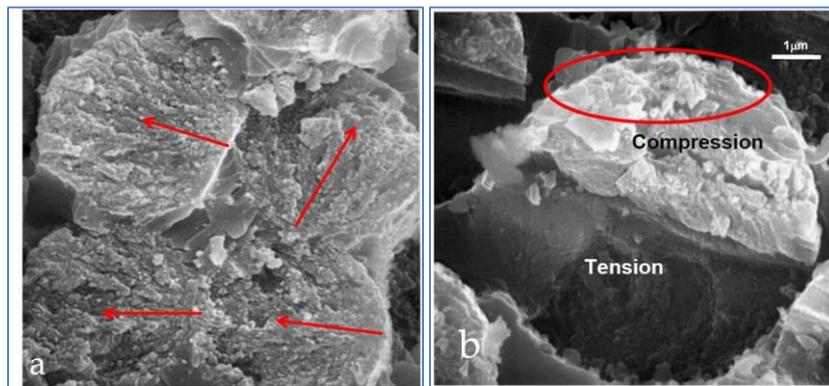


Figura 27. Figura 27a, morfología de fractura de las fibras en tensión y figura 27b morfología de compresión en CFRP (carbon fiber reinforced polymers) [27].

La figura 28 muestra una probeta de fibra de carbono fracturada en modo de tensión, la superficie aparentemente es rugosa y se pueden apreciar líneas de Chevron.



Figura 28. Probeta de compuesto reforzada con fibra de carbono fracturada en modo de tensión.[28]

El patrón de fractura “debonding” es un mecanismo de fractura que da origen al patrón de delaminación, la separación de capas en compuestos laminados y que representa uno de los modos de fractura más comunes [29].

Las flechas en color rojo de la figura 29 indican regiones donde el patrón que se observa sugiere la acción de este mecanismo de fractura, en el que el avance de la grieta se ve favorecido por la falta de adherencia o cohesión entre fibra y la matriz, ocasionando que la fibra se desprenda cuando se encuentra bajo la acción del campo de esfuerzos en la zona de proceso al frente de la grieta.

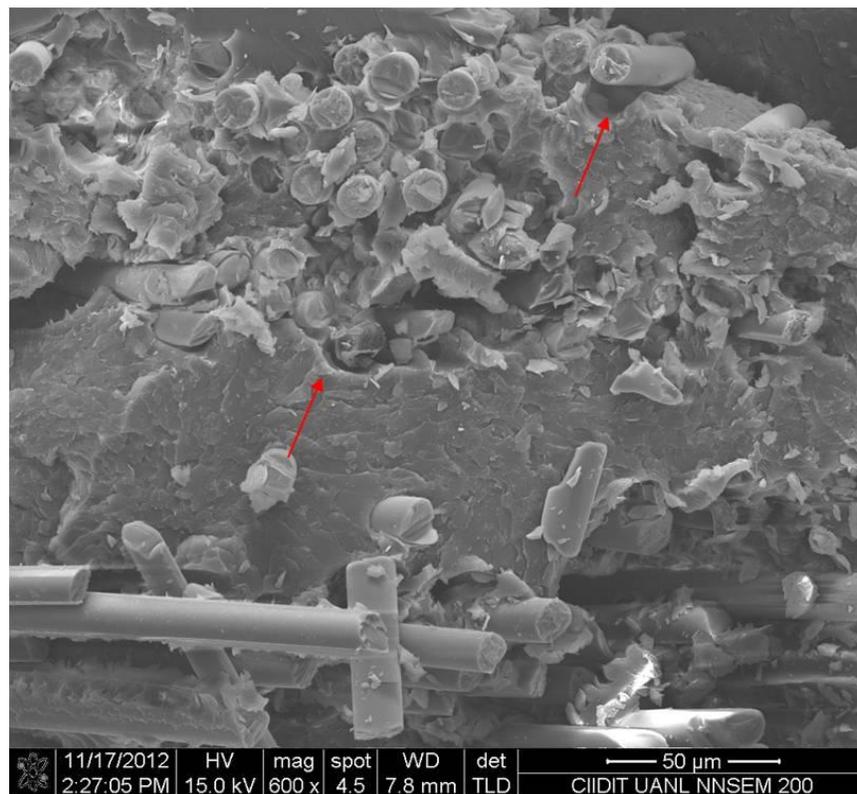
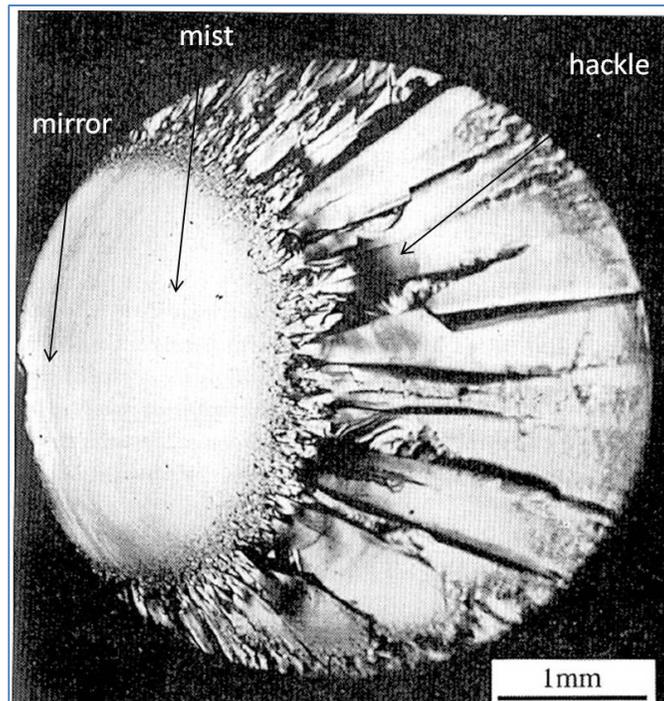


Figura 29. Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 600x [30].

Un ejemplo importante de fractografía en materiales cerámicos son los patrones mirror ó espejo, mist ó difusa y hackles. Este fenómeno es una buena herramienta para el estudio de problemas de fractura. La figura 30 muestra este tipo de patrón en una superficie de fractura de vidrio inorgánico que fue sometido a tensión.



*Figura 30. Patrón de fractura mirror ó espejo, mist ó difusa y hackles en una probeta de vidrio sometida a tensión [31].*

## Capítulo 2. Maquinado y calidad superficial en los materiales compuestos de matriz polimérica

### 2.1. Maquinados en los materiales compuestos de matriz polimérica

Como se ha dicho anteriormente sobre los materiales compuestos, estos han sustituido en muchas aplicaciones a los materiales tradicionales, por sus extraordinarias propiedades ya descritas. Particularmente en los maquinados, exhiben problemas particulares como son la anisotropía y sus características abrasivas.

En la figura 31 se muestran esquemas de algunos de los maquinados convencionales más practicados hoy en día dentro de la industria manufacturera, utilizándose comúnmente en la industria aeroespacial y automotriz, como también en aplicaciones marinas, artículos deportivos, componentes biomédicos, etc. [11,32].

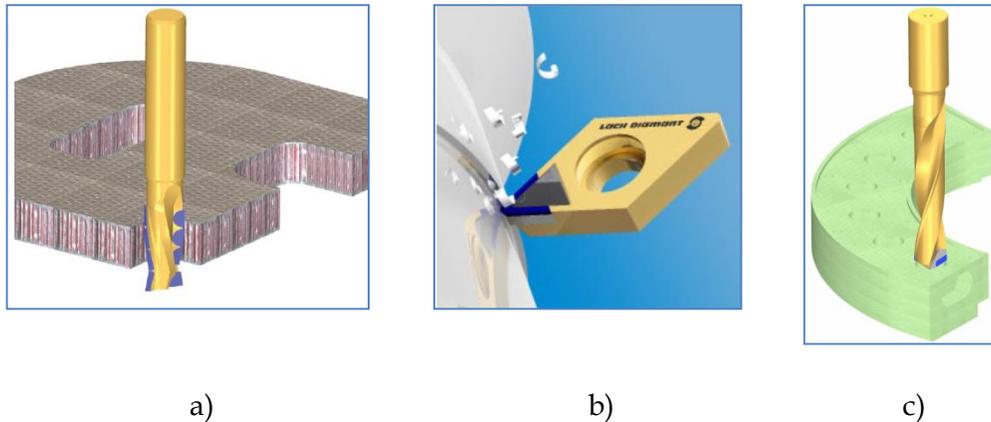


Figura 31.-Maquinados convencionales más usados en la industria manufacturera.

a) Fresado) b) Torneado) c) Taladrado

Antes de definir maquinado, se definirá maquinabilidad, la cual es representada bajo la propiedad del material que regula la facilidad o dificultad con la que se puede maquinar bajo un conjunto dado de parámetros o condiciones [33].

Con esto, se podrá definir lo que significa maquinado de compuestos: maquinar diferentes materiales en un mismo tiempo, es decir, maquinar la resina y las fibras orgánicas.

Al realizar el maquinado en los materiales compuestos, se encuentran factores que influyen en la calidad de la superficie del material que vienen dadas bajo los parámetros tales como la velocidad de corte, velocidad de avance y profundidad de corte mostrados en la figura 32. El maquinado de materiales compuestos en base a fibras difiere en muchos aspectos del maquinado en materiales metálicos, ya que el comportamiento de los materiales compuestos estará influenciado por la estructura la cual es heterogénea, ya que depende de las propiedades de la matriz, de la fibra, la orientación de las fibras, la resistencia de la unión entre la fibra y la matriz, y el tipo de tejido.

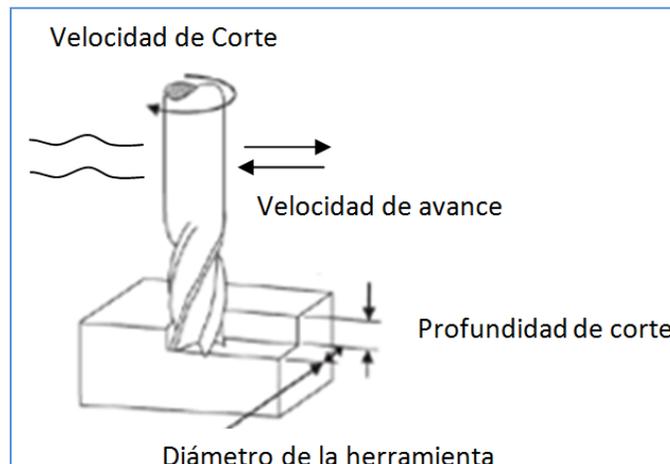


Figura 32 .- Parámetros que influyen en la calidad superficial de un material compuesto [34]

En la figura 33, se observan las herramientas de corte en base a carburo (K) y diamante policristalino (PCD), consideradas las más comunes para la realización de los maquinados debido a que estos materiales brindan unas propiedades mecánicas y térmicas de gran importancia como son la duración de filo, fatiga, etc. [19].



a)



b)

*Figura 33.- Material de herramientas de corte comunes en el mercado manufacturero. a) Carburo (K) b) Diamante (PCD)*

Al aplicar dicha operación sobre los materiales, estos presentan daños en los bordes de las piezas, obteniendo así una visibilidad de las fibras en el material, delaminación del material, degradación térmica y obtención de una superficie rugosa puesto que las fibras fueron arrancadas y cortadas. Para evitar lo máximo este tipo de daños, se ha utilizado como método de maquinado la herramienta de corte en fresado, ya que dentro de la industria manufacturera es el más común debido al bajo costo de obtención de las piezas. Las industrias más beneficiadas en este proceso son las del sector automotriz y aeroespacial, donde la calidad es un factor importante en la producción de moldes de precisión [35,36].

Algunas ventajas del fresado respecto a los otros métodos de maquinado son la alta resistencia al desgaste debido a la calidad de los materiales empleados, alta precisión de corte y un afilado con su respectivo montajes de manera rápida y eficaz generando así un bajo costo de mantenimiento [37]. Con esto la productividad de las operaciones se pueden aumentar y la calidad de los productos se puede mejorar mediante el uso de mayores velocidades de corte a las que actualmente son aplicadas en los cortes convencionales. [38]. El reto actual para el maquinado de un material compuesto está dado por la capacidad de predecir las fuerzas de corte, ya que es esencial para la

selección de los parámetros del proceso que dé lugar a un daño mínimo en las superficie [39].

### 2.1.1. Maquinado en fibra de vidrio

En la figura 34 se muestra un esquema de maquinado en un compuesto reforzado con fibras de vidrio, obteniendo un desgaste por el flanco de la herramienta, ya que juega un papel importante considerándolo un factor de gran importancia en el mantenimiento de la exactitud de los productos ya que durante el maquinado la herramienta ha estado en contacto con la pieza de trabajo. El uso de la herramienta durante un tiempo particular, conduce al desgaste y este es uno de los factores que afectan el estado de la herramienta como también son los parámetros del maquinado tales como la velocidad de corte, fuerza de corte, la velocidad de avance, la profundidad de corte y la orientación de las fibras, ya que impactan en el desgaste del flanco de la herramienta [40].

Actualmente se sabe que el mecanismo de corte en los materiales compuestos de fibra de vidrio se debe a la combinación de la deformación plástica, cizallamiento, y de flexión por el choque dependiendo de la flexibilidad, la orientación y la tenacidad de las fibras [41]. De aquí, se desprende la calidad del producto, que va dependiendo de las fibras, materiales de la matriz utilizada, resistencia de unión entre la fibra y la matriz, tipo de tejido, etc. [42].



Figura 34.- Maquinado a un material polimérico compuesto de fibra de vidrio

### 2.1.2. Maquinado en fibra de carbono

Durante la fabricación de componentes de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono (CFRP), por lo general es necesario llevar a cabo un paso post-maquinado después del curado, con el fin de cumplir con las tolerancias requeridas y para la fabricación de montaje y superficies de unión (figura 35). Los procesos de producción clásicas tales como fresado y taladrado se utilizan principalmente para esto. Comúnmente en el proceso de maquinado a menudo ocurre el fenómeno de delaminación, el cual tiene lugar en las capas superiores de los bordes maquinados. Tal daño requiere un alto costo post-maquinado para la reparación del mismo llegando en algunos casos al rechazo de los componentes [43].



*Figura 35.- Sujeción de una pieza de material compuesto de fibra de carbono para la realización del maquinado.*

Como se ha visto, maquinar compuestos es un campo de investigación y desarrollo abierto. La diferencia en las propiedades de las fases constituyentes hace que el mecanismo de eliminación de material sea complejo. Las teorías desarrolladas para materiales más homogéneos, tales como los metales no caracterizan completamente la maquinabilidad de los materiales compuestos. La herramienta de selección de materiales y el diseño, la optimización de las condiciones de trabajo y el medio ambiente, la evaluación y caracterización de los daños, los mecanismos de remoción de material, son algunos de los aspectos clave que piden atención inmediata [12].

Actualmente la industria sobre todo la automotriz y la aeroespacial requieren que las máquinas sean cada vez más revolucionadas (con más velocidad), por lo que el rango

de las tolerancias se ha recortado. Estas tolerancias también se reducen en la medida que se fabrican piezas cada vez de menor tamaño como los productos y sistemas que utilizan la nanotecnología.

## **2.2. Calidad superficial**

La calidad de las superficies maquinadas es de gran importancia para satisfacer los incrementos en la demanda del desempeño, durabilidad, y confiabilidad de las componentes sofisticadas. La fabricación de componentes en la industria militar, aeroespacial, automotriz y en general, están sujetas a condiciones más severas de esfuerzos, temperatura, y ambientes hostiles que aquellas para usos en equipo doméstico [44].

Con lo anterior se define lo que llamamos calidad superficial y ha sido descrito como: La condición inherente o mejorada de una superficie producida en un maquinado u otra operación de generación de superficie, o el “valor” topográfico, mecánico, químico y metalúrgico de una superficie manufacturada y su relación al desempeño funcional [45].

Desde el punto de vista de la ciencia e ingeniería de materiales, la topografía se ocupa de la descripción del conjunto de particularidades geométricas naturales o artificiales que caracterizan a una superficie. En cierta manera es un pleonasma hablar de topografía de superficies. Uno de los conceptos que se usan en topografía para describir la irregularidad de las superficies es el de rugosidad. La cuantificación de la rugosidad es uno de los problemas que aborda la topometría [46].

La calidad superficial exigida en aplicaciones industriales va orientada hacia el grado de rugosidad desarrollada en las superficies maquinadas, y en diversas aplicaciones es necesario tener una rugosidad alta como en otras ocasiones será esta condición indeseable. En algunos casos, se busca que la superficie del producto terminado

presente un mínimo de rugosidad, ya que esto le genera un brillo mejorando así, la apariencia del producto y disminuye la fricción de la superficie al estar en contacto con otra, reduciendo el fenómeno de desgaste y la corrosión o erosión de dichos materiales [45]. Si la calidad superficial de un material es baja, el rendimiento funcional será malo, y si la calidad superficial es alta, el rendimiento funcional será bueno, por lo tanto, el aspecto de la calidad superficial es importante al hablar de los materiales en general. Aunado a esto, se ha implicado una serie de factores importantes que derivan de la calidad superficial como es el existente deseo por la industria de reducir costos y mejorar la calidad en el marco de competencia internacional, existiendo cada vez más el reconocimiento de las implicaciones legales en el rendimiento del producto como también se han encontrado varias fallas catastróficas las cuales, cuando la evidencia fue analizada, mostraron el daño y lo peligroso que llegan a ser las transformaciones del material en la superficie y sub-superficies causadas por una generación excesiva de calor durante la manufactura.

En la actualidad, progresivamente ha crecido la demanda de componentes fabricados con materiales plásticos reforzados con fibras, debido a su precisión dimensional y a su acabado superficial. Para conseguir la rugosidad deseada, es necesario conocer los mecanismos de corte y desprendimiento del material y la cinética de los procesos de maquinado, que afectan al comportamiento de las herramientas de corte. Este estudio de las superficies constituye una técnica de caracterización de los materiales muy útil en la práctica [18].

El acabado superficial en el maquinado de los materiales compuestos es un punto importante en la fabricación de aplicaciones de ingeniería que tienen un efecto considerable sobre algunas propiedades como la resistencia al desgaste, reflexión de la luz, la transmisión de calor, el recubrimiento y la resistencia a la fatiga [41].

### **2.2.1.- Rugosidad**

Para comprender lo que significa rugosidad es necesario comprender que es una superficie. Una superficie es un borde que separa una capa o sustancia de otra, este se conoce como rugosidad nominal que no incluye la rugosidad en la superficie. Comúnmente se utiliza ampliamente como índice de calidad del producto y en muchos casos como requerimiento técnico de los componentes mecánicos ya que la superficie de los productos fabricados es definida bajo las normas internacionales estándar dadas por la ISO SR 4287/2001 [47].

La rugosidad superficial determina la apariencia y su comportamiento con otros compuestos como pinturas, barnices selladores, etc, como también en la disminución de la fricción con otra superficie manufacturada, la deformación por contacto, el calor y la conducción de la corriente eléctrica, tensión de uniones de contacto y la precisión posicional en el rendimiento de las piezas mecánicas [19, 37, 48].

Por esta razón, se han llevado a cabo diversas investigaciones con el objetivo de optimizar los parámetros de corte, para obtener una determinada rugosidad y así asegurar la calidad de los productos maquinados [18, 49].

### **2.2.2.- Calidad superficial en el fresado de los materiales compuestos**

La calidad de la superficie desempeña un papel muy importante en el rendimiento del fresado ya que una superficie fresada de buena calidad mejora significativamente la resistencia a la fatiga y la resistencia a la corrosión llevando de la mano la rugosidad de la superficie, siendo este un parámetro que tiene una influencia mayor en la precisión dimensional, el rendimiento de piezas mecánicas y en los costos de producción. Por estas razones, la evolución de la investigación se ha llevado a cabo con el fin de optimizar las condiciones de corte para llegar a una rugosidad de la superficie específica para poder así evitar los atributos funcionales ya descritos con anterioridad.

El fresado de materiales compuestos es una tarea bastante compleja debido a su heterogeneidad y problemas asociados con las características del material y los parámetros de corte, siendo así la más frecuente en la fabricación de partes de plásticos reforzados con fibras, debido a la forma de realizarlos (net-shape o formas complejas ) que a menudo requiere la eliminación del exceso de material para el control de las tolerancias generando así una exigencia alta respecto a la calidad superficial [35]. A fin de reducir estos problemas, y lograr la calidad deseada y la estabilidad dimensional de la superficie maquinada, es necesario entender los mecanismos de corte, de arranque de material y la cinética de los procesos de maquinado ya que pueden afectar el rendimiento de las herramientas de corte. Tomando en cuenta lo anterior, se prosiguió a definir el valor del factor de delaminación ( $F_d$ ), el cual se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{W_{max}}{W}$$

Donde  $W_{max}$  es el ancho del daño máximo en mm y  $W$  la anchura nominal de corte en mm [49].

La relación entre la rugosidad de la superficie y los parámetros de corte difiere de la teórica aplicable para los metales, ya que, para los materiales compuestos la microestructura no es homogénea, lo que se traduce en detalles de la superficie de deformaciones y fracturas a nivel micro, por ejemplo, extremos de fibra que sobresalen, picos de material y agujeros de la matriz deformada con desunión entre las fibras y la matriz [48], también se presentan en problemas relacionadas al curado de la resina.

El factor que afecta la calidad superficial de un material compuesto esta dado principalmente por la velocidad de avance, ya que es el parámetro de corte que presentan la influencia estadística y física más alta en rugosidad de la superficie [19, 41] seguida por la velocidad de avance y la profundidad de corte. Se ha demostrado que la rugosidad y el perfil de las superficies maquinadas dependen en gran medida de la

orientación de la fibra, del tipo de fibras y de la dirección del maquinado aplicado [18, 41].

Otro factor que determina la rugosidad de la superficie, es la herramienta seleccionada, ya que para ello, influye el diámetro de la herramienta de corte, siendo este, un parámetro crítico al momento de ser cuidadosamente seleccionado al producir el maquinado o el estudio de los daños [50].

Un factor que no se debería de pasar por alto es el desgaste de la herramienta, ya que es el resultante del movimiento relativo entre las superficies que interactúan y es una función de los materiales implicados y el entorno operativo. Su prevención en la medición es de gran importancia, debido a las aplicaciones prácticas, y es llevada a cabo bajo la inspección de ingeniería de superficies, como también por la detección de fallos de revestimiento [51].

### **2.3.-Técnicas y métodos para medir la rugosidad**

El método más usado en la industria para cuantificar la rugosidad de un material se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro. El tratamiento estadístico de los datos permite determinar parámetros como la rugosidad rms y la rugosidad promedio (Ra).

## Perfilómetro

La figura 36 muestra un rugosímetro o perfilómetro, ya que en general, es el equipo más utilizado en la industria para medir la rugosidad de los componentes comunes de ingeniería. El principio de operación de este equipo es simple: una fina punta en contacto con la superficie a analizar realiza un barrido controlado en línea recta y las variaciones de alturas se convierten en señales eléctricas registrándose o graficándose para poder así, estudiar los fenómenos del material [45].

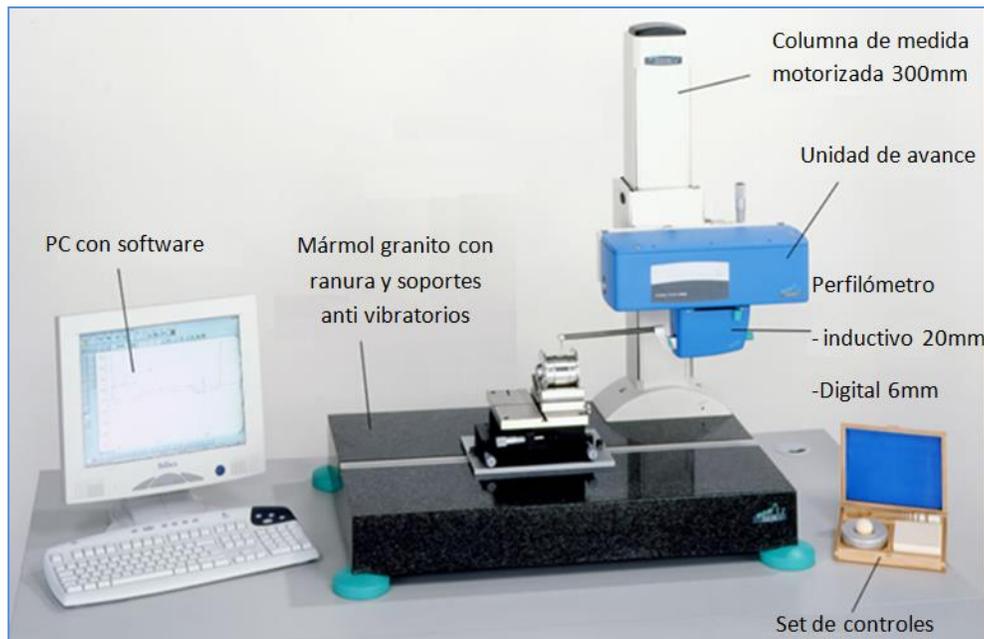


Figura 36.- Principio de operación de un rugosímetro perfilométrico.

Un parámetro sumamente importante para estos equipos es la forma y el radio de la punta, ya que ésta influye de forma importante en la resolución lateral de las mediciones. Típicamente se utilizan puntas con radios de algunos micrómetros,  $2\ \mu\text{m}$  es un valor común. Aunque la resolución vertical es generalmente menor que el radio de las puntas, no pueden detectarse con alta precisión valores de rugosidad menores al radio de la punta. En general, una punta burda o desgastada resulta en valores de rugosidad más bajos que los obtenidos usando puntas finas. Típicamente un

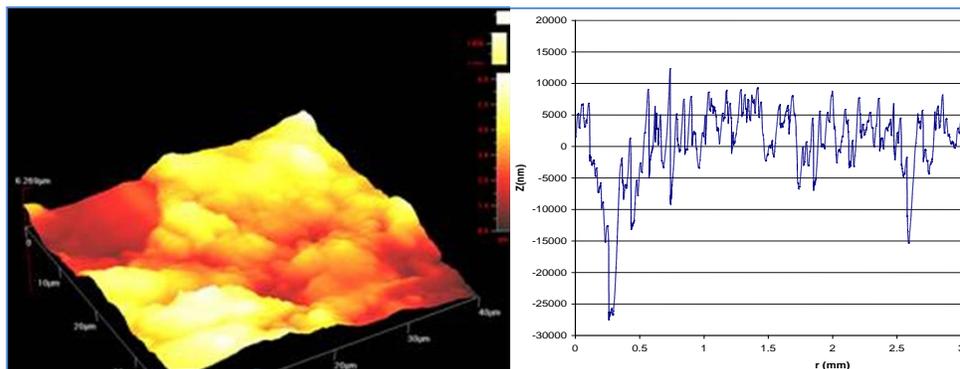
perfilómetro permite longitudes de muestreo de hasta algunos centímetros con resolución micrométrica [45].

### Otros equipos

En general los equipos para medir la rugosidad pueden clasificarse como de contacto y de no-contacto. Además del perfilómetro, otro equipo de contacto es el microscopio de fuerza atómica (MFA), que en aplicación a observaciones topográficas puede considerarse como un perfilómetro de resolución sub-nanométrica que opera de forma similar al rugosímetro.

En la figura 37, se muestra una gráfica típica del MFA, permitiendo longitudes de muestreo máximas de 100  $\mu\text{m}$  con resolución nanométrica.

Otro método para medir la topografía de un material es utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido.



a) Imagen MFA

b) Perfil de Ra

*Figura 37.- Imagen obtenida del análisis mediante MFA de un material compuesto de fibra de vidrio. [53]*



Producir superficies poco rugosas tiene un costo, en la Tabla 8 se muestra el costo relativo de obtención de diferentes grados de Ra tal como se indican (en inglés) en el ASM Metals Handbook.

**Tabla 7.- Clasificación y costo de las superficie rugosas[48]**

Clase	Rugosidad, Ra ( $\mu\text{m}$ )	Costo relativo de obtención
Super finish	0.10	40
Polish	0.20	35
Ground	0.40	25
Fine	1.60	13
Semifine	3.2	9
Medium	6.3	6
Semirough	12.5	4
Rough	25	2
Cleanup	50	1

### **Capítulo 3. Antecedentes, motivación, hipótesis y objetivos**

En esta sección se discuten los trabajos más recientes y revelantes encontrados en la literatura que han abordado el estudio de la calidad superficial de los materiales compuestos de matriz polimérica.

#### **3.1 Maquinado de compósitos reforzados con fibra de vidrio**

En 1999 *Eriksen* [54] utilizó como matriz el estireno acrilonitrilo (SAN) reforzado con 35% en peso de fibras de vidrio cortas, maquinado bajo el proceso de torneado, empleando como herramienta de corte el inserto de carburo de wolframio. Concluyó que la rugosidad aumenta al incrementar la velocidad de avance, y que, disminuye al aumentar el ángulo de corte. Sugiere que la rugosidad es independiente de la orientación de las fibras.

*Paulo Davim y asociados* en 2003 investigaron el compuesto PEEK GF30, maquinado en torneado con herramienta de diamante policristalino, y concluye que la rugosidad aumenta al aumentar la velocidad de avance y disminuye al aumentar la velocidad de corte. Concluyen que la velocidad de avance es un parámetro de maquinado que tiene una gran influencia en la superficie maquinada [55].

En 2004, *Palanikumar y asociados*, utilizaron el torneado en un compuesto de fibra de vidrio con un inserto TiC. Concluye que la rugosidad aumenta cuando se incrementa la velocidad de corte o al aumentar la profundidad de corte [56].

*Davim y Reis* (2004) analizaron el torneado de un compuesto PEEK GF30 (poli - éter - éter - cetona, 30% volumen de fibra de vidrio), usando un inserto de diamante policristalino y K20 (carburo), utilizando los mismos parámetros de corte da como resultados mejor rugosidad al utilizar el diamante policristalino [57].

En 2007, *Palanikumar* [48] utilizó el GFRP en torneado con inserto K12 (carburo), concluyendo que la rugosidad disminuye cuando se incrementa la velocidad de corte y aumenta al incrementar la velocidad de avance. Indican, que al cambiar la orientación

de la fibra, la rugosidad se verá incrementada pero, al incrementar la profundidad de corte, la rugosidad se verá disminuida.

*Palanikumar y Davim (2009)*, tornearon un compuesto de fibra de vidrio con matriz epóxica con la herramienta de corte de carburo cementado, concluyendo que al incrementar la velocidad de corte, aumenta el desgaste de la herramienta, seguida de la velocidad de avance. Esto es, debido que al aumentarla, aumenta la deformación plástica por efectos térmicos, ya que los materiales poliméricos no tienen buenas propiedades en la conducción del calor [40].

*Khan y Kumar (2010)* estudiaron la fibra de vidrio en una matriz de poliestireno usando una fibra con orientación respecto al corte de 90°. El maquinado realizado fué el torneado obteniendo resultados en los cuales indican que la calidad superficial está influenciada por la velocidad de corte. Concluyó que al aumentar la velocidad de corte, la abrasión de la herramienta aumenta severamente [58].

*Hussain y colaboradores (2011)*, reportaron el uso de la herramienta de corte en carburo K20, nitruro de boro (CBN) y diamante policristalino maquinando en fibra de vidrio con matriz epóxica, la calidad superficial se ve influenciada por la velocidad de avance, velocidad de corte y por la orientación de las fibras. Concluyen que usando diamante policristalino se obtienen mejores resultados de calidad superficial seguido del nitruro de boro dejando en último lugar la herramienta de carburo, la cual generó altas rugosidades y altas fuerzas de corte. Consideran que la profundidad de corte tiene muy bajo efecto sobre la rugosidad presente en el maquinado [41].

En 2012, *Kumar y asociados*, investigaron el maquinado en fibra de vidrio con el torneado, utilizando la herramienta de corte de diamante policristalino, concluyendo que la rugosidad se ve afectada por la velocidad de avance seguido por la velocidad de

corte. Sostiene, que el medio para realizar el corte no influye significativamente en la rugosidad de la superficie [42].

En 1996, *Nieminen* [38], utilizó el fresado tanto para GFRP como CFRP, con la herramienta de corte en diamante policristalino, la calidad superficial se verá afectada al aumentar la velocidad de corte.

Por otra parte, *Ashok Rai* en 2013, demostró, que utilizando el proceso de fresado y carburo cementado como herramienta de corte, el diámetro de la herramienta utilizado es esencial para reducir el daño en la superficie maquinada, siendo este, el parámetro más crítico para reducirlo se concluye también que al aumentar la velocidad de avance y del diámetro de la herramienta, la rugosidad disminuirá, pero, al aumentar la velocidad de avance y al disminuir el diámetro de la herramienta, habrá un aumento en la rugosidad del material compuesto [50].

### **3.2 Maquinado de compuesto reforzados con fibra de carbono**

Los investigadores *Wang y Zhang* (2003), maquinaron CFRP utilizando como método de corte el torneado, concluyeron que el daño superficial está relacionado con la profundidad de corte, con la orientación de las fibras y el ángulo de ataque, generalizando, que a una menor profundidad de corte se genera un menor daño ya que a una profundidad mayor de corte (por ejemplo, 50 micras y 100 micras), el daño se hace más grave cuando la orientación de la fibra es de entre  $120^\circ$  y  $150^\circ$ . Dando como resultado que la rugosidad bajo estas condiciones de corte generalmente es alta [59].

Para *Davim y Reis* (2005), maquinaron el CFRP con la herramienta de corte de carburo cementado K10, y se determinó que la superficie rugosa se ve aumentada al incrementar la velocidad de avance, mientras, que disminuye al aumentar la velocidad de corte. También se concluye que la velocidad de avance es el parámetro más

importante para estudiar, debido a la física que implica en la delaminación del material compuesto. [19]

En 2009, *Mata y colaboradores* [60] utilizaron como herramienta de corte el diamante policristalino bajo el torneado, el cual demostraron que para un aumento de la velocidad de avance aumentará la rugosidad superficial del compuesto.

En un trabajo de *Sorrentino y Turchetta* (2011), se utilizó como matriz la resina epóxica con un 50% en volumen de fibra de carbono con la orientación  $0^\circ$  y  $90^\circ$  bajo el método de fresado con un inserto de carburo, concluyendo que al disminuir la velocidad de avance disminuye la rugosidad, como también, al incrementar la velocidad de avance y de corte, la fuerza de corte tiende a incrementarse [35].

Del análisis del estado del arte resumido en la anterior discusión, se pueden concluir diversos aspectos, destacando los principales parámetros influyentes en la calidad de las superficies maquinadas que son: la velocidad de avance, la velocidad de corte, la profundidad de corte, así como la orientación de las fibras (ver apéndice A). Diferentes trabajos desarrollados sobre el torneado y fresado de los plásticos reforzados con fibras concluyeron que la rugosidad superficial aumenta con la velocidad de avance [19, 48, 50, 54, 55, 60] y la orientación de las fibras [59] y disminuye con el aumento de la velocidad de corte [19, 48, 50, 55], la profundidad del corte y su orientación de la fibra [48] como también el diámetro de la herramienta [50]. Estos resultados resaltan el uso de la herramienta de carburo cementado seguido de PCD para los materiales compuestos de fibra de vidrio y carbono.

También se encuentran trabajos en los cuales se concluye que la rugosidad superficial aumenta al incrementar la velocidad de corte [38, 40, 41, 42, 56] seguida de la velocidad de avance [40, 42] y la profundidad del corte [56, 59] y disminuyendo al aumentar la velocidad de avance [35, 50] como su profundidad de corte [59]. Estos resultados resaltan el uso de las herramientas de PCD seguido por TiC y nitruro de boro para los materiales compuestos de fibra de vidrio y carbono.

Todos estos elementos, están asociados a la calidad y a la funcionalidad de los componentes de un maquinado en los materiales compuestos. Para esto los trabajos [19, 55] en fibra de vidrio como fibra de carbono, mencionan que la velocidad de avance es el parámetro más influyente en la rugosidad del material producido por un maquinado controlado y concuerdan que se deberá estudiar con más énfasis la solución del problema estudiando la física que involucra la herramienta de corte con el material. Los trabajos [41, 57] demuestran que la herramienta de diamante policristalino da como resultado una mejor rugosidad comparada con el carburo.

### **3.3 Motivación**

Habiendo documentado la importancia de desarrollar recursos humanos y conocimiento a nivel científico y tecnológico en la manufactura de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras, se ha encontrado un área específica que requiere particular atención es la relacionada con los parámetros que influyen la calidad superficial de los componentes elaborados con estos materiales y que son sometidos a procesamiento secundario tal como el maquinado. Queda claro que, en comparación con lo que ocurre en materiales metálicos, existen relativamente pocos estudios que analizan el maquinado de estos compuestos, más aún, la gran mayoría de los trabajos enfocan la atención en el efecto de los parámetros de maquinado sobre la rugosidad, con escasa atención a la influencia de la estructura del material. Prácticamente existen pocos trabajos que aborden este tema reconociendo que el maquinado produce un daño superficial semejante a una fractura localizada y existe un área de oportunidad a través del estudio de los aspectos físicos que determinan o dan origen a la rugosidad de estas superficies maquinadas y, por ende, a su calidad superficial.

### **3.4 Hipótesis**

La rugosidad de los materiales compuestos está influenciada por la interacción de la herramienta de corte con el material, produciendo un daño semejante al ocurrido en un proceso de fractura que se caracteriza por una superficie rugosa.

### **3.5 Objetivo general**

Aportar conocimientos acerca de los factores que determinan la calidad superficial en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras, cuando éstos son maquinados considerando los aspectos físicos involucrados y tomando en cuenta los parámetros de maquinado así como los parámetros microestructurales.

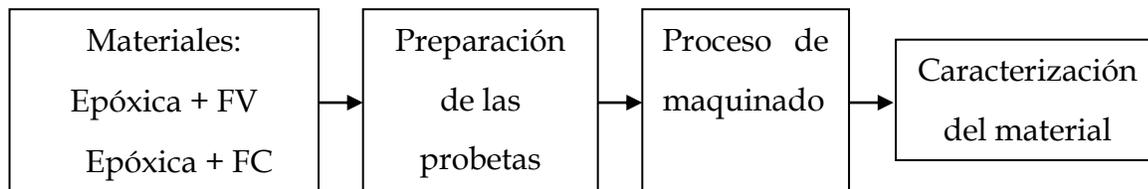
### **3.6. Objetivos específicos**

1. Documentar el efecto de los parámetros convencionales de velocidad de avance y de corte sobre la calidad superficial de los materiales compuestos.
2. Relacionar los parámetros de corte y los efectos producidos por el maquinado en la calidad superficial, con los parámetros estructurales de los materiales compuestos estudiados.

## Capítulo 4. Procedimiento experimental

Para cumplir con el objetivo de este trabajo de investigación es necesario el desarrollo experimental del mismo, el cual incluye la preparación y el maquinado de las probetas, la caracterización mediante pruebas de rugosidad y microscopia electrónica de barrido.

A continuación se muestra un diagrama de operaciones de los pasos que se realizaron durante el procedimiento experimental.



### 4.1. Materiales a utilizar

Originalmente se encuentra la fibra de vidrio (ES/EH84) y la fibra de carbono (Hexcel M21 - T700) pre-impregnada en rollo a una temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  (especificaciones del fabricante) teniendo un tejido estilo plain weave con dirección de  $0^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  para la fibra de vidrio y de manera unidireccional para la fibra de carbono. Partiendo de estas especificaciones, la fibra de vidrio y carbono se recortaron a un ángulo de  $0^{\circ}$  y  $45^{\circ}$  obteniendo la forma cuadrada con una medida de  $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ . Algunas de las propiedades mecánicas de dichas resinas se encuentran en las Tablas 8 y 9 respectivamente.

**Tabla 8.- Propiedades de la resina epóxica Hexcel ES/EH84 [61]**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.2
Resistencia a tensión, MPa	600
Módulo de tensión , GPa	21
Temperatura de transición vítrea, Tg (°C)	95
% de fibra	50

**Tabla 9.- Propiedades de la resina epóxica Hexcel M21 - T700 [62]**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.28
Resistencia a tensión, MPa	4900
Módulo de tensión , GPa	230
Temperatura de transición vítrea, Tg (°C)	-3
% de fibra	35

#### **4.2. Preparación de probetas de fibra de vidrio y carbono**

El laminado fue realizado tanto para fibra de vidrio como de carbono de manera simétrica [0, +-45, 90]s la cual se muestra en la figura 39, teniendo para la fibra de vidrio un espesor de 4.5 mm mediante la colocación de 16 capas (4[0, +-45, 90]s) o láminas de fibra [63] previamente recortadas, mientras que para la fibra de carbono se utilizó un espesor de 2.6 mm mediante la colocación de 8 capas de dicha fibra previamente cortada y orientada (2[0, +-45, 90]s).

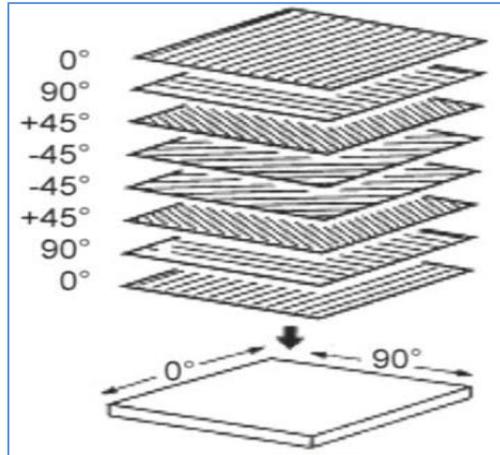


Figura 39.- Proceso de laminado simétrico para un material compuesto [64]

### Preparación de las muestras pre - curado

Este proceso es desarrollado para fabricar las probetas que posteriormente serán maquinadas bajo estándares y parámetros específicos.

#### Material utilizado:

1. Tela de arranque (peel ply)



2. Película de liberación (release film)



3. Purgador (bleeder)

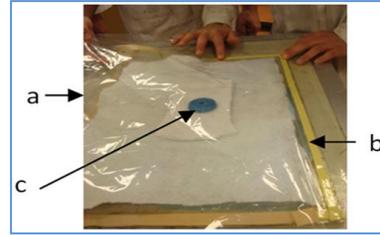


4. Película de ventilación (breather)



## 5. Bolsa de vacío:

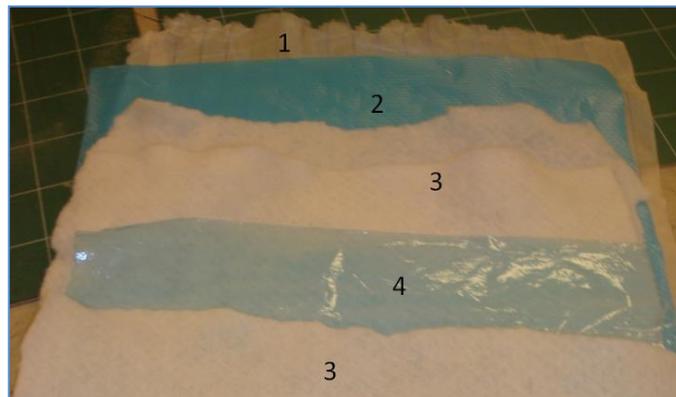
- (a) Bolsa de Vacío)
- (b) pegamento doble cara
- (c) base de válvula de vacío



## 6. Colocación de la válvula de vacío



El modo de acomodo de las películas y bolsas de vacío para realizar el curado del material se llevó a cabo como se muestra en la figura 40.



*Figura 40.- Procedimiento de acomodo para la preparación de la muestra rumbo al curado:  
1.- Tela de arranque. 2.- Película de liberación (release film) 3.- Purgador (bleeder)  
4.- Película de ventilación (breather)*

## Curado del material compuesto

El proceso de curado de ambos material se llevó a cabo en un horno electrónico convencional, el cual será descrito en los siguientes puntos.

### **Fibra de vidrio**

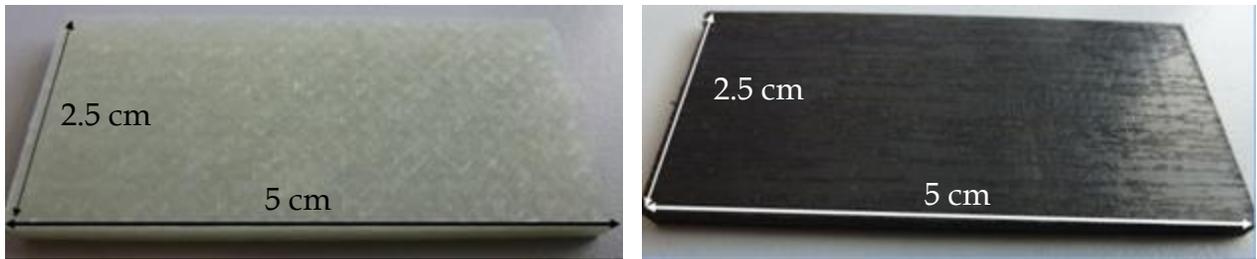
Partiendo del laminado ya preparado para su proceso de curado, se procedió a enviarlo al horno electrónico convencional, al cual le corresponde una temperatura máxima de operación de 120°C y una presión interior dada por la bomba de vacío de 1bar. El proceso a realizar [61] parte de la temperatura ambiente (25° C) con una rampa de calentamiento de 2°C/min hasta los 90°C, manteniéndolo durante 45 minutos para después pasar a una temperatura final de 120°C con una rampa de 2°C/min, manteniéndolo durante 90 min. Una vez curado, se llevará a cabo el proceso de enfriamiento controlado dado por el mismo horno electrónico hasta llegar a la temperatura ambiente reposando la pieza por un mínimo de 24 hrs.

### **Fibra de carbono**

Partiendo del laminado ya preparado para su proceso de curado dentro del horno electrónico convencional, el cual corresponde a temperatura máxima de operación de 180°C con una presión interior de 1 bar dada por la bomba de vacío. El proceso a realizar [62, 65] parte de la temperatura ambiente (25°C) con una rampa de calentamiento de 2°C/min llegando a la temperatura máxima de 180°C, manteniéndolo durante 2 horas para la realización de la polimerización correspondiente. Una vez curado, se llevará a cabo el proceso de enfriamiento controlado dado por el mismo horno electrónico hasta llegar a la temperatura ambiente reposando la pieza por un mínimo de 24 hrs.

### **Proceso de corte del material pre-maquinado**

Para ambos materiales, el proceso de corte se llevó a cabo mediante una máquina de corte manual con un disco de diamante policristalino, las piezas se cortaron a una longitud de 5 cm por un ancho de 2.5 cm mostradas en la figura 41 [65].



a)

b)

Figura 41.- Dimensiones de las probetas de trabajo en fibra de vidrio (a) y fibra de carbono (b)

### 4.3. Herramientas para realizar el maquinado

Las herramientas de corte utilizadas en las probetas se describirán a continuación.

#### Fresado

La operación de fresado se llevó a cabo por la fresadora ISEL Flatcom M50 con una potencia de 2.2KW la cual tiene como parámetros de operación los enlistados en la Tabla 10.

Tabla 10.- Condiciones de operación de la fresadora

Velocidad de corte (Vc)	24000 RPM
Velocidad de avance (Vf)	250 mm/s

La herramienta utilizada para realizar el corte en las probetas de fibra de vidrio y fibra de carbono es la Dixi 7112 (SiC). D= 5 x 20 mm. En la Tabla 11 se detallaran las condiciones de operación para realizar el corte en los materiales.

Tabla 11.- Condiciones de operación de la herramienta de corte para fresado Dixi 7112

Velocidad de corte (Vc)	250 - 500 m/min	
Velocidad de avance (Vf)	500 - 2000 mm/min	

## Disco de Diamante policristalino

La operación de corte con diamante se llevó a cabo con una cortadora automática teniendo como parámetros principales los señalados en la Tabla 12.

**Tabla 12.- Condiciones de corte para la herramienta disco de diamante policristalino**

Velocidad de corte ( $V_c$ )	0 - 19 mm/min	
Velocidad de avance ( $V_f$ )	5000 rev	

## Parámetros de maquinado

Para realizar el maquinado correspondiente a las fibras de vidrio y carbono, se seleccionaron los parámetros mostrados en la Tabla 13 [18, 32, 48, 57, 60, 66, 67, 68].

**Tabla 13 .- Parámetros para el maquinar el compuesto a base de fibra de vidrio  
- carbono**

Herramienta	Vel de corte ( $V_c = \text{rpm}$ )	Vel de avance ( $V_f = \text{mm/rev}$ )
Fresado	9500	0.01
	14400	0.05
		0.1
		0.2
Diamante Policristalino	5000	5
		12
		19

## 4.4. Procedimiento de maquinado

El proceso de maquinado se llevó a cabo mediante una fresadora automática y una cortadora automática. A continuación se explicará más a detalle su procedimiento.

## Fresadora

Para los materiales tanto de fibra de vidrio como de fibra de carbono, se seleccionaron tres probetas y se les realizó el maquinado teniendo en común el mismo parámetro de maquinado y las mismas condiciones de trabajo (Tabla 13). Se tomó como variante el sentido de avance de la herramienta dando un avance positivo y un avance negativo, que viene dado por el giro de la herramienta tanto a favor como en contra de las manecillas del reloj, el cual se detalla en la figura 42.

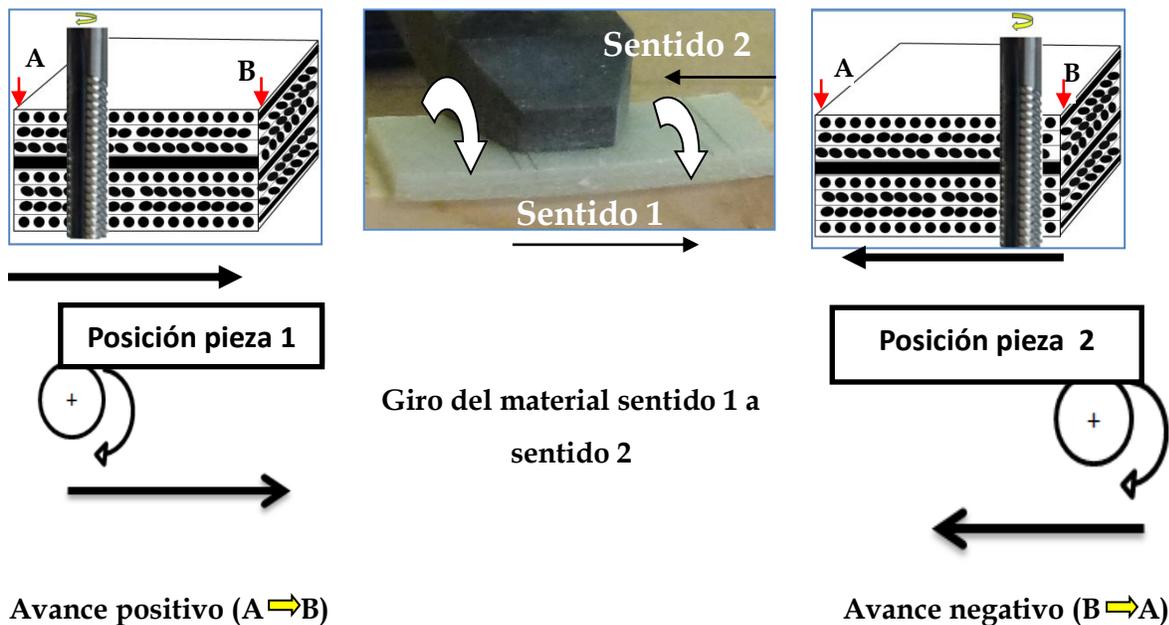


Figura 42.- Dirección de giro de la herramienta de fresado relacionado al sentido de avance

Para la realización del maquinado, se utilizó un ajustador para sujetar la pieza a la base de madera y así realizar el maquinado correspondiente con un sentido positivo de avance; finalizando el maquinado, se girará la pieza para realizarle el maquinado pero con el avance negativo y bajo los mismos parámetros de maquinado (Figura 42).

## Disco de diamante policristalino

Se realizó el maquinado utilizando una cortadora automática (figura 43) y usando como refrigerante el agua. Para esta prueba se utilizó una probeta para cada condición de trabajo según la Tabla 13 teniendo para cada una de ellas el total de dos maquinados, siguiendo el mismo concepto detallado del inciso b de la figura 41.



Figura 43.- Cortadora automática para el proceso de maquinado en diamante policristalino

## 4.5. Técnicas instrumentales

Las técnicas instrumentales utilizadas para desarrollar posteriormente el análisis, serán descritas a continuación.

### Perfilometría

Como parte de la caracterización física del material, se midió la rugosidad del mismo compuesto en base a fibra de vidrio y fibra de carbono empleando el rugosímetro convencional SURFCOM 1500SD2 con una punta de medición de  $0.1\mu\text{m}$ , teniendo como objetivo la realización de tres mediciones por cada sentido de la pieza como se detalla en la figura 44.

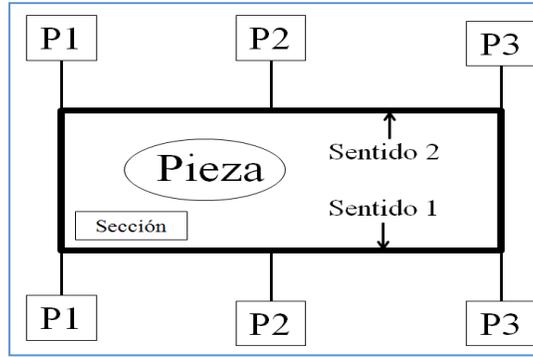


Figura 44.- Puntos para la medición de la rugosidad en el material

## Digitalización de imágenes

Una vez obtenidas los perfiles de rugosidad, se procedió a realizar la digitalización de las imágenes, hasta lograr obtener las rugosidades en forma de grafica con valores en el eje “x” y en el eje “y” mostradas en la figura 45.

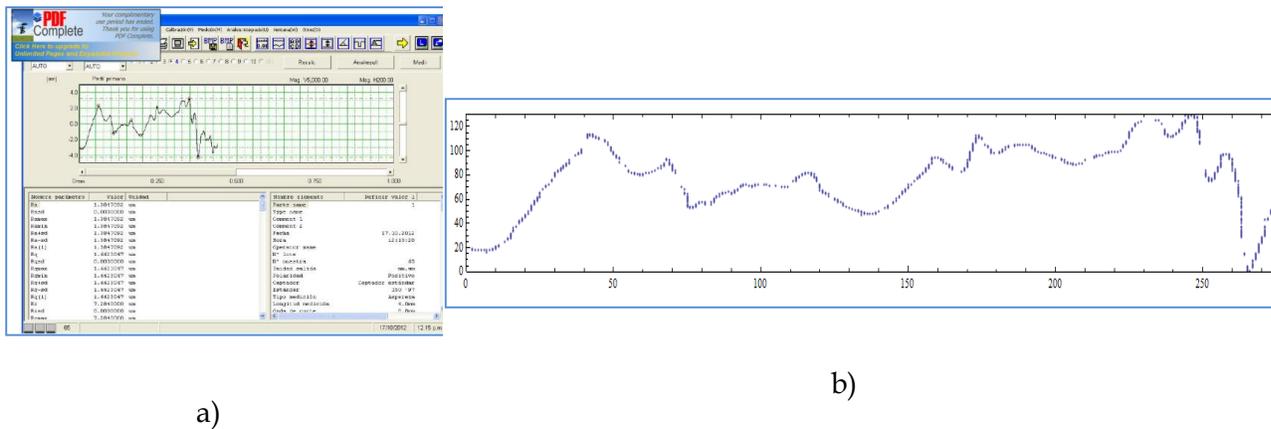


Figura 45.- Imagen de grafica rugosimétrica en coordenadas (x,y). a) Imagen original b) Imagen digitalizada

## Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La caracterización microscópica de ambos materiales se llevó a cabo mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) JOL-JSM-6510LV para visualizar el daño generado por el proceso de maquinado en la microestructura del material.

## **Capítulo 5. Resultados y discusión**

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos, mostrando primero el estudio de la rugosidad de las superficies obtenidas; posteriormente se describe y discute la estructura de los materiales, así como el daño producido en ellas por el maquinado para finalmente discutir de manera integral los aspectos del maquinado, sus parámetros y la estructura de los materiales analizados.

### **5.1. Rugosimetría**

En esta sección se presentan los resultados de rugosidad, organizados por el tipo de material y el proceso de maquinado. En las figuras 46 y 47 se muestran todos los resultados en representación tridimensional, mismos que se discuten por separado en las siguientes secciones.

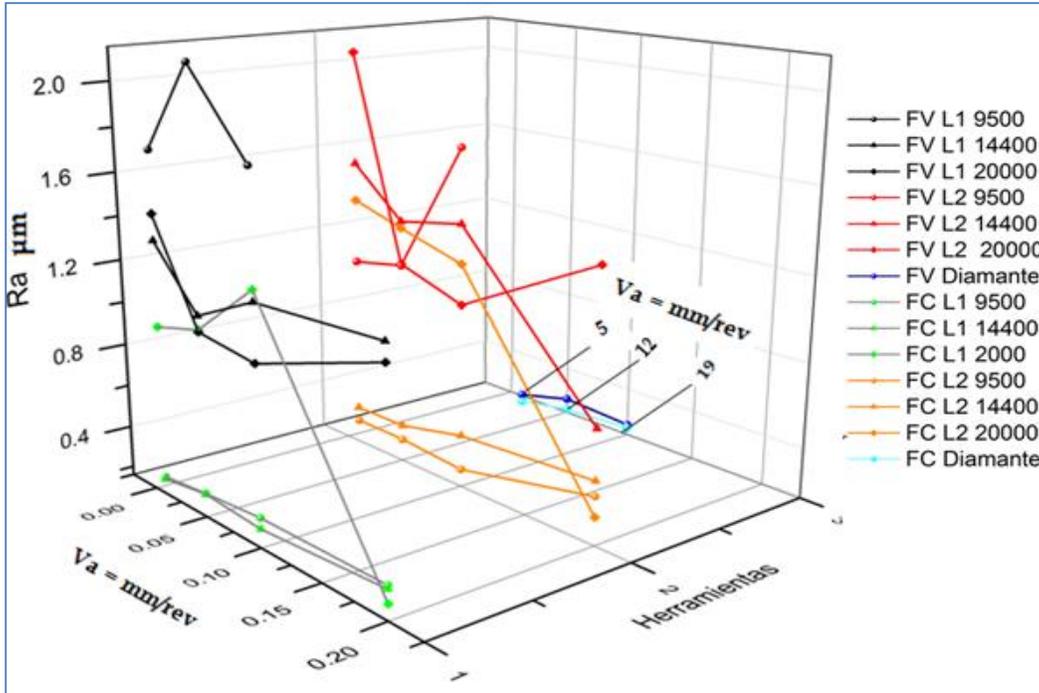


Figura 46.- Resultados de Ra en las probetas de material compuesto reforzado con fibra de vidrio y carbono respecto a la herramienta de corte utilizada: 1) Fresado sentido de corte 1. 2) Fresado sentido de corte 2. 3) Disco de PCD

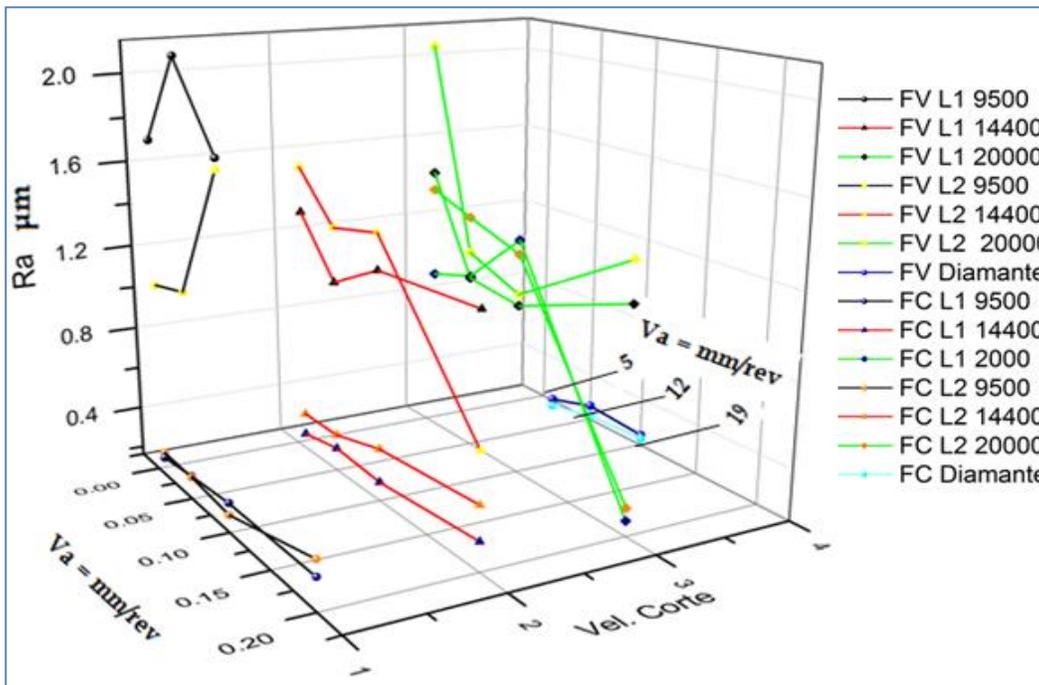


Figura 47.- Resultados de Ra en las probetas de material compuesto reforzado con fibra de vidrio y carbono respecto a la velocidad de corte utilizada: 1) 9500 rpm. 2) 14400 rpm. 3) 20000 rpm 4) 5000 rpm.

### 5.1.1. Rugosidad de las superficies maquinadas de la muestra de compuestos reforzados con fibra de vidrio

#### Proceso de fresado

En la tabla 14 y en la figura 48 se muestran los resultados de rugosidad promedio, Ra, obtenidas para el maquinado mediante fresadora. La Fig. 48 (a) ilustra los resultados correspondientes al fresado en el sentido 1, para las tres diferentes velocidades de corte, en función de la velocidad de avance.

Se observa que en general la rugosidad es inversamente proporcional a la velocidad de corte, la menor rugosidad se obtiene para la mayor velocidad de corte en el sentido 1 y viceversa para el sentido 2, estos resultados concuerdan con los reportados en la literatura [39, 48, 50, 54, 55]. Por otro lado, no se observa una variación sistemática de la rugosidad con la velocidad de avance, si bien el efecto parece ser el mismo en las dos velocidades de corte más altas, se ve el efecto contrario para la velocidad de corte más baja.

**Tabla 14.- Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de fresado en materiales reforzados con fibras de vidrio**

Velocidad de corte (m/min)	Velocidad de avance (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ ) Promedio	
		Vel avance	
		Sentido 1	Sentido 2
9500	0.01	1.7415	1.0789
	0.05	2.1458	1.1265
	0.1	1.7851	1.7374
14400	0.01	1.3430	1.5557
	0.05	1.0788	1.3354
	0.1	1.2311	1.3979
	0.2	1.2711	0.6862
20000	0.01	1.4614	2.0748
	0.05	1.0075	1.1343
	0.1	0.9732	1.0278
	0.2	1.1920	1.3815

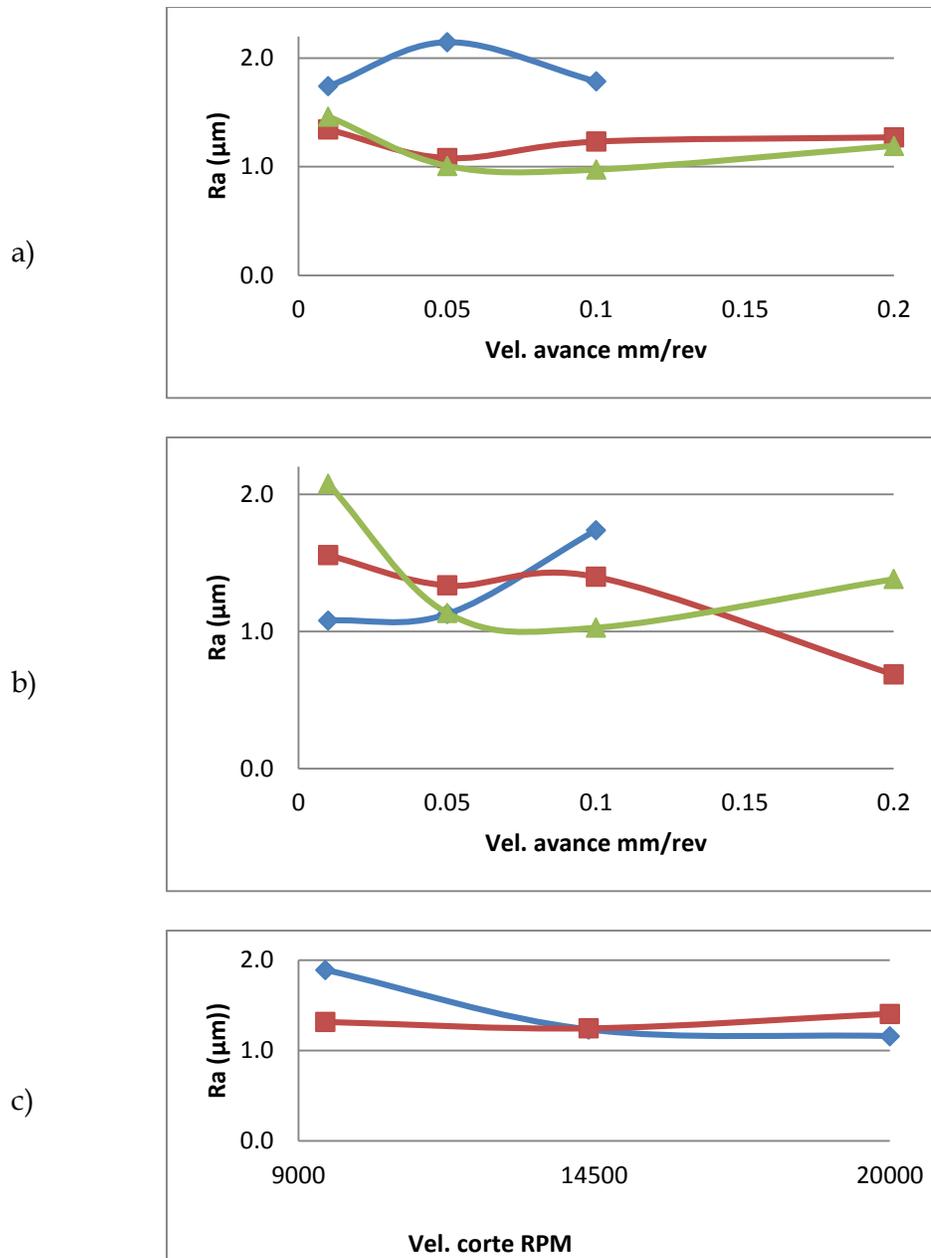


Figura 48.- Rugosidad promedio ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ) presente en las piezas de fibra de vidrio maquinadas por medio del fresado. a) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 1 (positivo). b) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 2 (negativo). c) Rugosidad presente en el maquinado conforme la velocidad de corte: Línea azul: sentido 1. Línea roja: sentido 2.  $\blacklozenge$   $V_c = 9500$  rpm  $\blacksquare$   $V_c = 14400$  rpm  $\blacktriangle$   $V_c = 20000$  rpm.

En la Tabla 15, se hace un resumen de las rugosidades presentes en el material, tomando en cuenta su velocidad de corte ( $V_c$ ) y su velocidad de avance ( $V_a$ ).

**Tabla 15.- Comparación de la rugosidad promedio por punto de medición.**

<b>Medición</b>	<b>Sentido</b>	<b>Velocidad corte <math>V_c = \text{RPM}</math></b>	<b>Velocidad avance: <math>V_a = \text{mm/rev}</math></b>	<b>Rugosidad <math>R_a (\mu\text{m})</math></b>
<b>P1</b>	1	20000	0.01	0.98
	2	<b>14400</b>	<b>0.2</b>	<b>0.79</b>
<b>P2</b>	1	14400	0.1	0.801
	2	<b>20000</b>	<b>0.2</b>	<b>0.73</b>
<b>P3</b>	1	14400	0.05	0.74
	2	<b>14400</b>	<b>0.2</b>	<b>0.53</b>

De acuerdo a la tabla anterior, la Tabla 16 muestra el modo de operar la fresadora para generar la rugosidad más baja o de mejor calidad superficial.

**Tabla 16.- Parámetros de corte adecuados para una calidad superficial óptima en el fresado de fibra de vidrio**

<b>Parámetro de Corte</b>	<b>Valor</b>
Sentido de Corte	Sentido 2, Avance negativo de la herramienta.
Velocidad de corte ( $V_c$ )	14400 RPM
Velocidad de avance ( $V_a$ )	0.2 mm/rev
Calidad superficial	Ground - fine ( $0.4 \mu\text{m} - 1.6 \mu\text{m}$ )

## Proceso de corte con disco de diamante policristalino

En la Tabla 17 y en la figura 49 se muestran los resultados de rugosidad promedio, Ra, obtenidas para el maquinado mediante la cortadora con disco de diamante policristalino. La figura 49 ilustra los resultados correspondientes al análisis rugosimétrico del maquinado en función de la velocidad de avance donde de manera general se observa que la rugosidad es prácticamente constante en valores cercanos a  $0.2 \mu\text{m}$ , nótese que este valor de rugosidad es sensiblemente más bajo que el obtenido para el maquinado con fresadora discutido en la sección anterior.

**Tabla 17.- Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de corte con disco de diamante policristalino en el material compuesto reforzado de fibras de vidrio.**

Velocidad de Corte RPM	Velocidad de Avance mm/rev	Ra ( $\mu\text{m}$ ) Velocidad de Avance
5000	5	0.1670
	12	0.2335
	19	0.2119

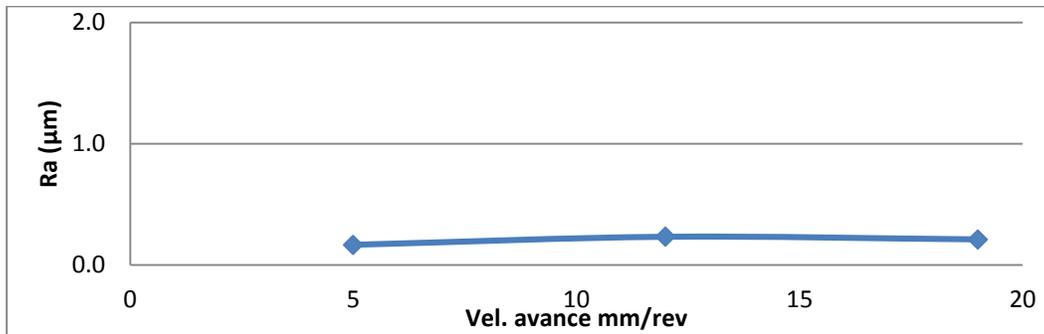


Figura 49.-Rugosidad presente en las fibras de vidrio cortadas mediante disco de diamante policristalino con una velocidad de corte de 5000rpm. Rugosidad promedio ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ) presente por velocidad de avance.

### **5.1.1.3. Comparación entre las herramientas de corte fresado – disco de diamante**

En el maquinado con la herramienta de fresado, la rugosidad promedio ( $R_a$ ) varía entre la clasificación ground – semifine, es decir, una rugosidad de entre  $0.4 \mu\text{m}$  –  $3.2 \mu\text{m}$ . Por otro lado, la herramienta de disco de diamante presenta una rugosidad que varía entre super finish – ground, es decir, entre  $0.1\mu\text{m}$  –  $0.4 \mu\text{m}$ . En ambos procesos, no se observa una variación sistemática de la rugosidad respecto a la velocidad de avance; si bien el efecto parece ser el mismo en ambos procesos considerando la velocidad de avance más baja del proceso de fresado respecto al proceso de corte con disco de diamante. Caso contrario el sentido de avance 2 para el proceso de fresado, donde se muestra el mismo efecto pero con resultados contrarios.

### **5.1.2. Rugosidad de las superficies maquinadas de la muestra de compuestos reforzados con fibra de carbono**

#### **Proceso de fresado**

En la Tabla 18 y en la figura 50 se muestran los resultados de rugosidad promedio,  $R_a$ , obtenidas para el maquinado mediante fresadora. La Fig. 50 (a, b) ilustra los resultados correspondientes al fresado en el sentido 1, para las tres diferentes velocidades de corte, en función de la velocidad de avance. Se observa que en general la rugosidad aumenta conforme se incrementa la velocidad de corte (Fig. 50 c), caso contrario al trabajo propuesto por Paulo Davim [19]. Por otro lado, la rugosidad correspondiente a las primeras dos velocidades de corte en ambos sentidos presenta el mismo comportamiento reportado en las referencias [19, 59, 60]. Para la velocidad de corte más alta, la rugosidad no presenta una variación sistemática en el sentido de corte 1 respecto a la velocidad de avance, caso contrario en el sentido de corte 2 [35, 67]; para ambos sentidos de corte la rugosidad más baja corresponde a la velocidad de avance más alta.

**Tabla 18 .-Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de fresado en materiales compuestos reforzados con fibra de carbono**

Velocidad de Corte (m/min)	Velocidad de Avance (mm/rev)	Ra ( $\mu\text{m}$ ) promedio Velocidad de avance	
		Sentido 1	Sentido 2
9500	0.01	0.2421	0.2667
	0.05	0.2695	0.2653
	0.1	0.2967	0.2416
	0.2	0.3093	0.3840
14400	0.01	0.2309	0.3345
	0.05	0.2674	0.3350
	0.1	0.2472	0.4074
	0.2	0.2942	0.4539
20000	0.01	0.9514	1.3785
	0.05	1.0178	1.3038
	0.1	1.2829	1.2168
	0.2	0.2317	0.2906

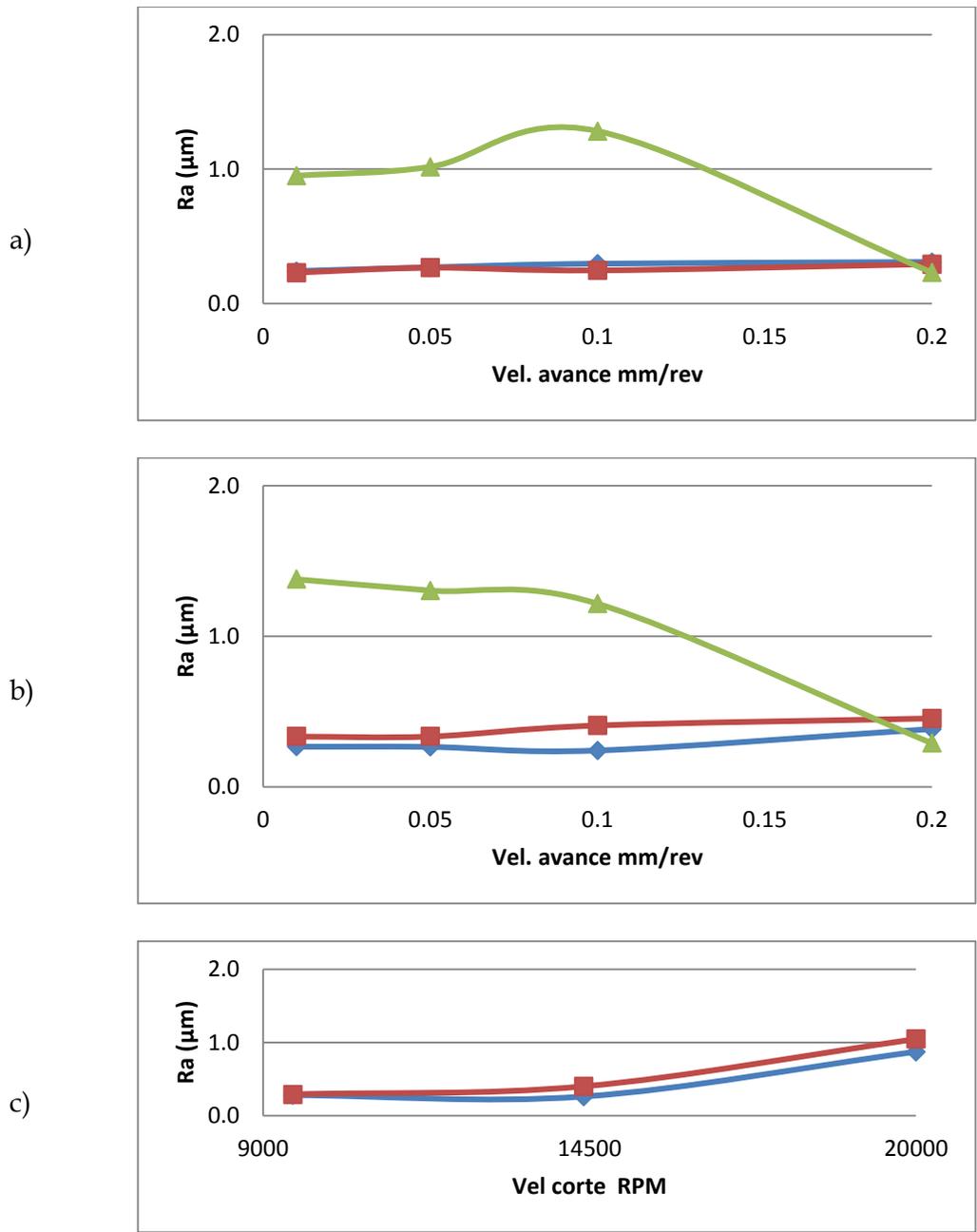


Figura 50.- Rugosidad promedio ( $p_1$ ,  $p_2$ , 3) presente en las piezas de fibra de carbono maquinadas por medio del fresado. a) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 1 (positivo). b) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 2 (negativo). c) Rugosidad presente en el maquinado conforme la velocidad de corte= Línea azul: Sentido 1. Línea roja: sentido 2. ◆  
 Vc= 9500 rpm ■ Vc= 14400 rpm ▲ Vc= 20000 rpm

En la Tabla 19 muestra un resumen de todas las rugosidades presentes en el material, tomando en cuenta su velocidad de corte ( $V_c$ ) y su velocidad de avance ( $V_a$ ).

**Tabla 19.- Comparación de la rugosidad promedio por lado y por punto de medición.**

Medición	Sentido	Velocidad corte $V_c = \text{rpm}$	Velocidad avance: $V_a = \text{mm/rev}$	Rugosidad $R_a (\mu\text{m})$
P1	1	14000	0.2	0.1067
	2	9500	0.01	0.1292
P2	1	14400	0.01	0.1313
	2	9500	0.01	0.1313
P3	1	20000	0.02	0.117
	2	9500	0.01	0.2131

De acuerdo a la tabla anterior, la Tabla 20 muestra el modo de operar la fresadora para generar la rugosidad más baja o de mejor calidad superficial.

**Tabla 20.- Parámetros de corte adecuados para una calidad superficial óptima en el fresado de fibra de carbono**

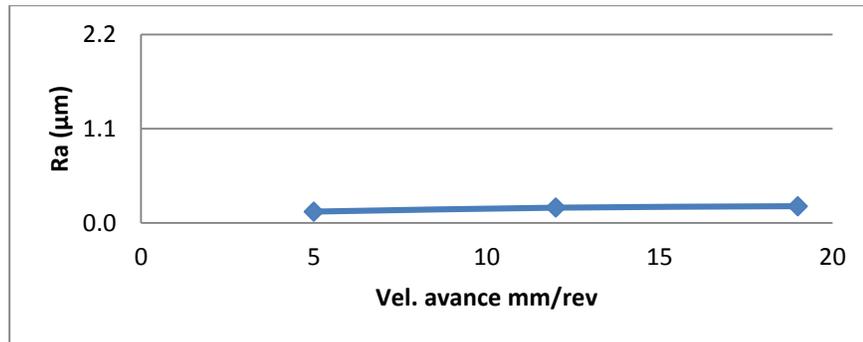
Parámetro de Corte	Valor
Sentido de Corte	Sentido 1, Avance positivo de la herramienta.
Velocidad de corte ( $V_c$ )	14400 rpm 20000 rpm
Velocidad de avance ( $V_a$ )	0.2 mm/rev
Calidad superficial	Super finish - ground (0.1 $\mu\text{m}$ - 0.4 $\mu\text{m}$ ).

## Proceso de corte con disco de diamante policristalino

En la Tabla 21 y en la figura 51 se muestran los resultados de rugosidad promedio, Ra, obtenidas para el maquinado mediante la cortadora con disco de diamante policristalino. La figura 51 ilustra los resultados correspondientes al análisis de rugosidad del maquinado en función de la velocidad de avance donde de manera general se observa que la rugosidad superficial aumenta al incrementar la velocidad de avance (Va) en concordancia con los resultados reportados por Petropoulos [67].

**Tabla 21.- Resultados de rugosidad promedio durante el corte con disco de diamante en piezas de fibra de carbono.**

Velocidad de corte RPM	Velocidad de avance mm/rev	Ra ( $\mu\text{m}$ ) Promedio Velocidad de avance
5000	5	0.1306
	12	0.1768
	19	0.1942



*Figura 51.- Rugosidad presente en las fibras de carbono cortadas mediante disco de diamante policristalino con una velocidad de corte de 5000rpm. Rugosidad promedio (p1, p2, p3) presente por velocidad de avance.*

## **Comparación entre las herramientas de corte fresado - disco de diamante**

En el maquinado con la herramienta de corte mediante la fresadora, la rugosidad promedio varia dentro del rango de los 0.2  $\mu\text{m}$  hasta los 1.6  $\mu\text{m}$  comprendiendo así la clasificación polish - fine en los dos sentidos de corte.

Para la herramienta de disco de diamante, la rugosidad promedio está entre 0.1  $\mu\text{m}$  y 0.2  $\mu\text{m}$ , estando en la clasificación de super finish - polish. Por otro lado, el proceso de corte por disco de diamante policrsitalino muestra una variación sistemática de la rugosidad al incrementarse la velocidad de avance como en las dos primeras velocidades de corte en el proceso de fresado en ambos sentidos, caso contrario en la velocidad de corte más alta del proceso de fresado, donde al incrementar la velocidad de avance la rugosidad disminuye. Por otro lado, la rugosidad mínima en el proceso de fresado en ambos sentidos fue obtenida mediante la velocidad de avance y corte más alta, caso contrario al proceso de corte con disco de diamante la cual se obtuvo mediante la velocidad de avance más baja. En el apéndice B se presenta un análisis estadística de simetría y curtosis de los resultados de rugosidad obtenidos para las diferentes condiciones estudiadas.

### **5.2. Análisis del daño superficial**

En esta sección se discute el daño causado por las herramientas de maquinado en la superficie del material a nivel de la microestructura, es oportuno reiterar que en la literatura generalmente no se ha prestado atención al análisis superficial del daño producido en los materiales compuestos después de ser aplicado el maquinado. La discusión aquí presentada parte de la base de que el maquinado produce a nivel local un daño semejante al producido por los procesos de fractura, por lo que se recurre a la descripción fractográfica de las superficies de maquinado obtenidas.

#### **5.2.1. Proceso de fresado**

En el maquinado mediante la fresadora automática, se analizará el daño ocurrido tanto en las matriz como en las fibras de acuerdo a la dirección del maquinado realizado,

tomando en cuenta la dirección del avance de la herramienta ya sea positivo (L1) o negativo (L2) y los diferentes avances de velocidad de la herramienta. Comúnmente en el proceso de maquinado convencional se presentan los esfuerzos de flexión generalmente relacionados a los esfuerzos de compresión y de tensión simultáneamente al paso de la herramienta [69, 70].

### Muestras de material compuesto reforzado con fibras de vidrio

La figura 52 muestra la superficie del material compuesto con fibras de vidrio maquinado mediante fresado con  $V_c = 20000$  rpm y  $V_a = 0.2$  mm/rev, condiciones para las cuales se registró una rugosidad promedio entre  $0.8 \mu\text{m}$  y  $1.4 \mu\text{m}$ . En el punto 1, se puede observar que la muestra presenta un apilamiento defectuoso entre capas de fibras debido a la manera por la cual se llevó a cabo el curado dentro del horno, denotando una presión de vacío deficiente.

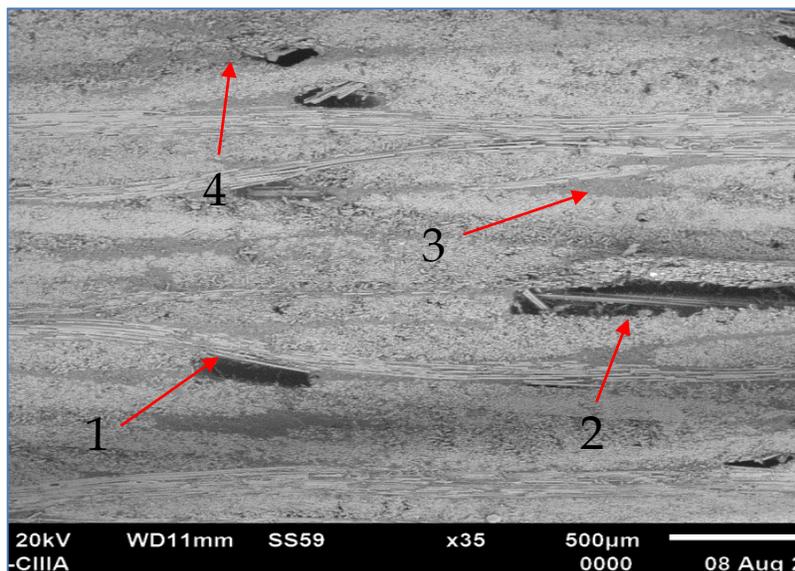


Figura 52.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada por fresado:  $V_c = 20000$  rpm.  $V_a = 0.2$  mm/rev.  $L = 1$ . Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35.

En el punto 2 se observa una cavidad resultante del arranque de material por la herramienta, esto se puede considerar que es favorecido por burbujas de aire atrapadas por un mal apilamiento de láminas.

En el punto 3, se observa una aglomeración de resina epóxica, el cual se puede presentar debido a la ausencia de fibras en el material tejido como también por una deficiente presión de vacío [71].

En el punto 4 se observa una grieta que se propagó a partir de una cavidad generada mediante el arranque de las fibras debido al paso de la herramienta de corte como también por porosidades del material produciéndose la propagación de manera intralaminar - transversal. Este resultado sugiere que, efectivamente, el proceso de maquinado produce fracturas a nivel local.

En la figura 53 presenta una imagen a mayor magnificación (500X), centrada en las cavidades (punto 2) de la figura 52 que fueron producidas por el arranque de material debido al paso de la herramienta de corte, mostrando un daño profundo en las probetas, donde en el punto 1 se observa la fractura de la fibra, así como fragmentos de las mismas esparcidos entre las diversas capas debido al arranque de ellas (punto 3), lo que se traduce en un alto daño superficial que a su vez resulta en una alta rugosidad local en esta zona.

Nótese que en el punto 2, el patrón de fractura evidencia falla local por tensión en las fibras, presumiblemente por el efecto de *pull-out* [72, 74]; en las fibras individuales es posible detectar el patrón característico de zonas *mirror* o *espejo*, *mist* o *difusa* y *hackle* o *fibrosa*. Esta evidencia documenta que efectivamente, el maquinado produce un daño superficial, que más específicamente consiste en fractura localizada, lo cual a su vez induce a especular que la topografía de una superficie maquinada a nivel local debe ser esencialmente la misma de una superficie de fractura, por lo que, sabiendo que existen muchos estudios [19, 35, 38 40, 41, 42, 48, 50, 54, 55, 56, 59, 60] acerca de la rugosidad de las superficies de fractura, el estudio de los efectos físicos en la calidad de las superficies maquinadas puede beneficiarse si se aplican juiciosamente las técnicas e interpretaciones que se emplean en la fractografía de vanguardia.

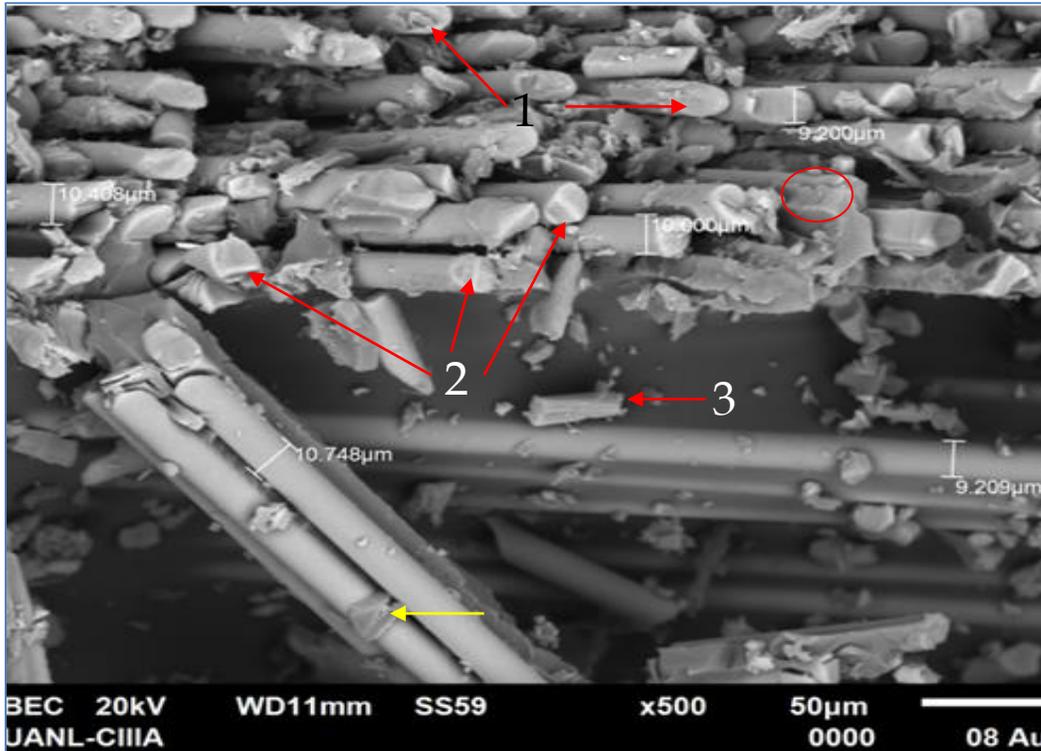


Figura 53.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c=20000$  rpm.  $V_a=0.2$  mm/rev  $L=1$ . Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500

En la misma figura, 53, se indica con una flecha amarilla la existencia de resina en la superficie de la fibra mostrando una buena adhesión en la interface fibra - resina del material.

En el círculo rojo mostrado en la figura 53, se pueden observar las marcas características de la fractografía de un material compuesto, donde queda en evidencia el esfuerzo de falla a tensión transversal de la fibra y resina [73]

En la figura 54, se observa, en comparación a la figura 50, un daño superficial más elevado, presentando múltiples cavidades, lo que explica que se registre una rugosidad promedio entre  $1 \mu\text{m}$  y  $2.2 \mu\text{m}$ . En el punto 1 se observa el patrón de fractura *Pull-out* debido a la tensión generada entre la interacción herramienta - material, tal como lo señala Harris [72]. En el punto 2 se observan múltiples fracturas generadas de manera intralaminar de manera transversal de la orientación de las fibras. En el punto 3 se

observa la fractura a tensión, al surgir un arranque de material se produce una propagación de fractura de manera interlaminar generando delaminación

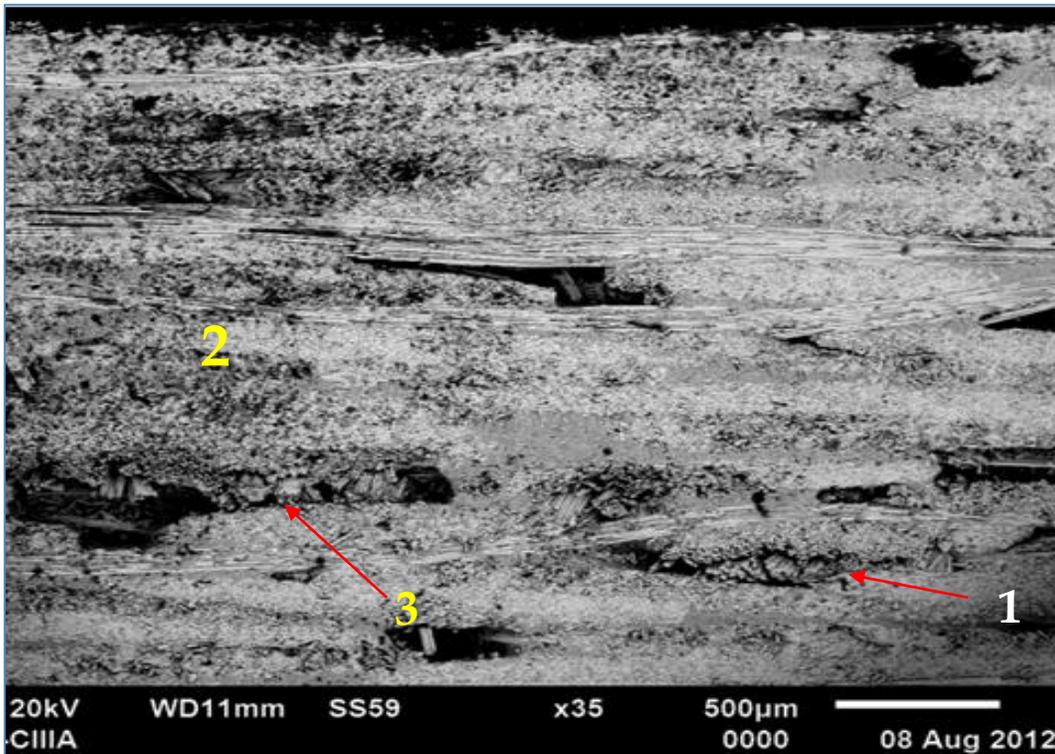


Figura 54.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c=20000$  rpm,  $V_a=0.2$  mm/rev,  $L=2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500

En la figura 55 muestra una imagen a mayor magnificación en las cavidades de la figura 54, observando en el punto 1 un patrón de fractura de marcas de río que se produce al liberar la energía al fracturarse las fibras.

En el punto 2 muestra la fractura local en la fibra a tensión representándose mediante el patrón de fractura mirror o espejo, mist o difusa y hackle o fibrosa.

En el punto 3 se observan pequeñas porciones de resina sobre la superficie de la fibra indicando una baja adhesión entre la fibra y la resina.

En el punto 4 se aprecia la fractura por debonding tal como lo describe A. Jumahat y coautores [69].

En el punto 5 se muestran fragmentos de resina y fibra debido a la compresión generada por el paso de la herramienta, morfología que ya había reportado Vinod Srinivasaa y coautores [75], se generan como patrón de fractura de micropandeo o microbuckling [73].

En el punto 5, la apariencia observada permite especular que se presenten fragmentos de resina embarrada entre o sobre las fibras, posiblemente debido a la fricción generada entre la herramienta y el material en el modo de fractura a compresión. Este tipo de daño no se ha encontrado reportado en la literatura consultada.

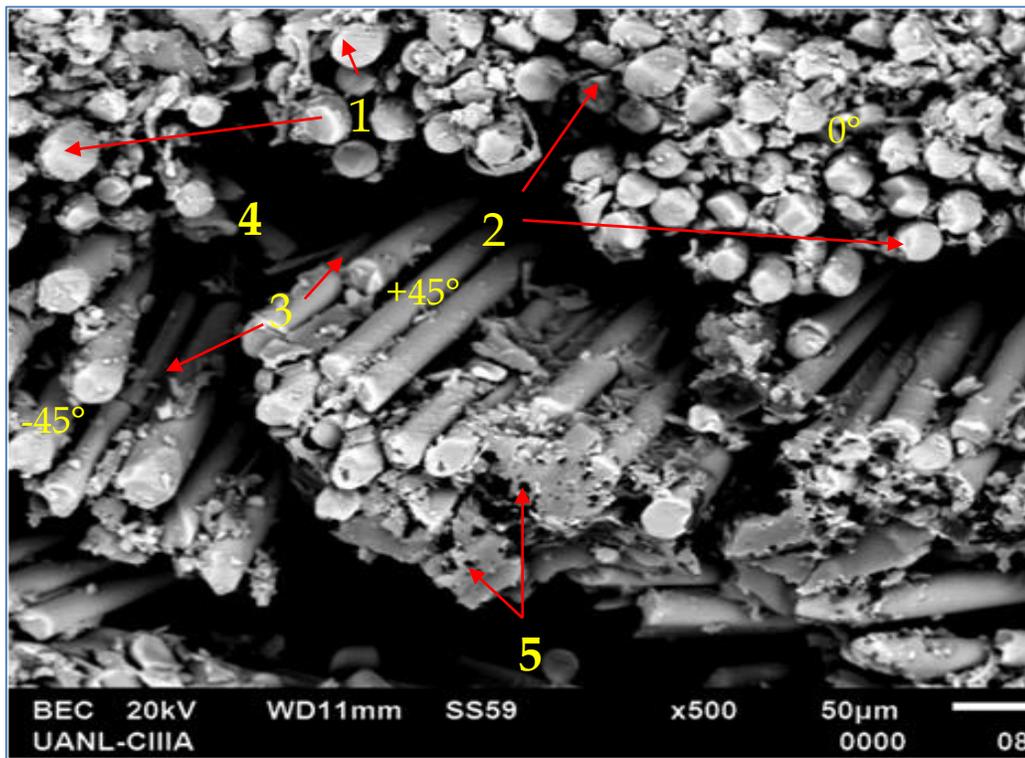


Figura 55.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c= 20000$  rpm,  $V_a= 0.2$  mm/rev,  $L= 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500

## Muestras de material compuesto reforzado con fibra de carbono

En la figura 56 muestra una imagen a baja magnificación (35X) donde se puede observar un acabado superficial de razonable buena calidad con una rugosidad promedio entre  $0.2 \mu\text{m}$  y  $1.4 \mu\text{m}$ , sin embargo en el punto 1 se observan múltiples propagaciones de grietas de manera intralaminar, puede suponerse que la propagación fué activada por el paso de la herramienta.

En el punto 3 se observa faltante de material (clean pull - out) debido a un efecto de tensión entre las fibras [73, 77] y al paso de la herramienta producido por la alta velocidad de corte la cual produce un arranque del material, se observan zonas de kink band y esto a su vez genera delaminación en forma de propagación de grietas iniciando en el punto 4 de manera interlaminar y terminando en la zona 2 propagándose de manera intralaminar.

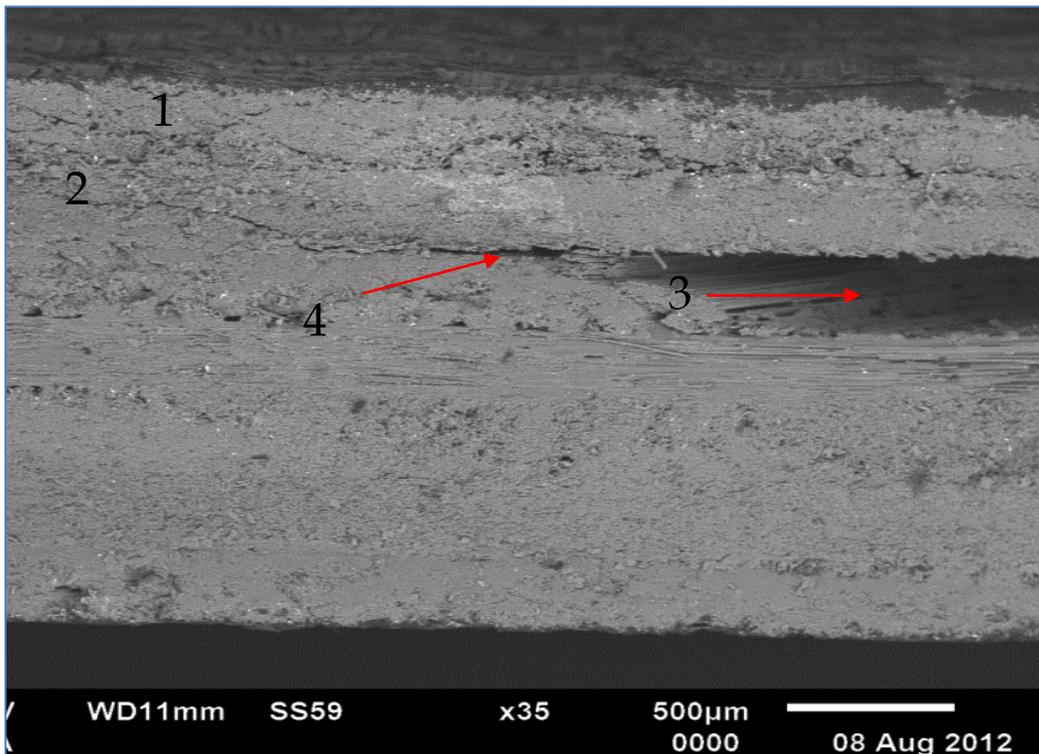


Figura 56.- Superficie del compósito reforzado con fibra de carbono maquinada en fresado:  $V_c=20000 \text{ rpm}$ ,  $V_a=0.2 \text{ mm/rev}$   $L=1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados  $20\text{kV}$   $\times 35$

En la figura 57 se muestra una superficies correspondiente al proceso con dirección de corte negativo (L2), en la cual a una baja magnificación se aprecia un daño superficial considerable, similar al corte positivo (1) de la figura anterior, donde la rugosidad promedio varía entre  $0.2 \mu\text{m}$  y  $1.4 \mu\text{m}$ , el cual en el punto 1 se observa delaminación, producido mediante la fractura al paso de la herramienta de corte a través del maquinado generando debonding donde la fibra se desprende de la resina por el esfuerzo de corte a tensión.

En el punto 2 se observan múltiples fracturas intralaminares de manera transversal en modo de tensión, lo cual también se observa en los puntos 3 y 4, estos patrones pueden ser favorecidos por la alta velocidad de corte

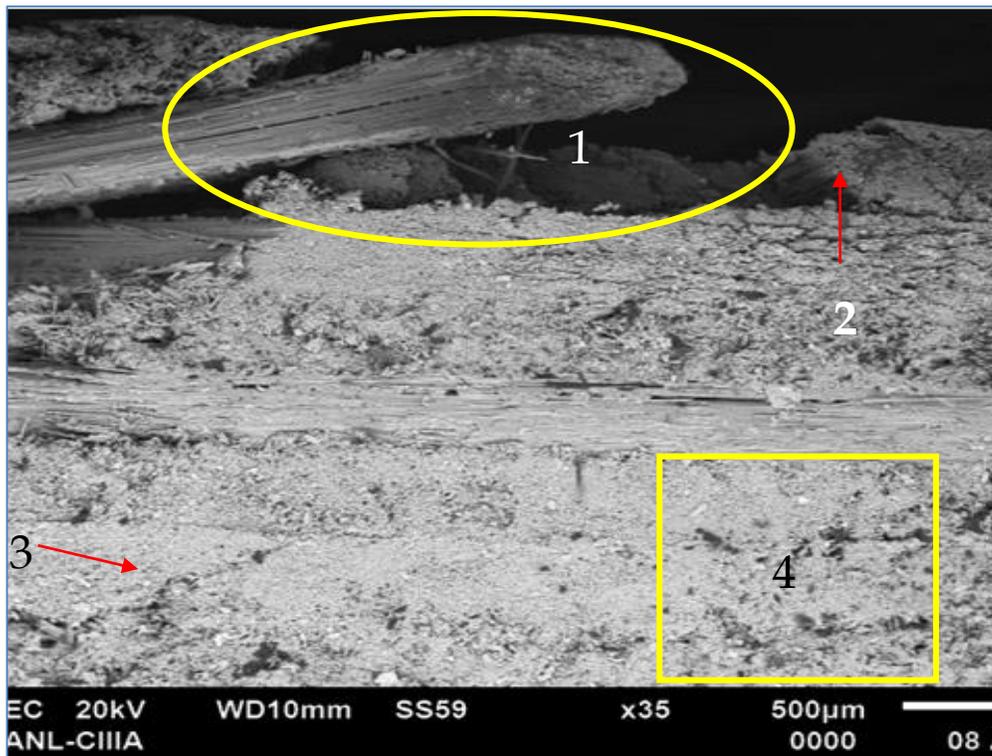


Figura 57.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinado en fresado:  
 $V_c = 20000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 0.2 \text{ mm/rev}$   $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados  $20\text{kV}$   $\times 35$

En la figura 58 se muestra una imagen a magnificación alta (500X) en la zona 4 de la figura 57, se observa un daño superficial alto; en el punto 1 se observa el daño generado en las fibras mediante la tensión producida entre la fibra y la herramienta, resultando en el efecto de Pull-out y en patrones de fractura a nivel local con zonas mirror o espejo, mist o difusa y hackle o fibrosa.

En el punto 2 y 3 se observa un corte efectivo debido a que la fractura se generó específicamente en las fibras quedando en claro que la adhesión entre la fibra y la resina en esta capa de laminado es buena. La fractura se debió a la ruptura de las fibras debido a la transferencia de carga de la resina hacia la fibra [30].

En el punto 4 se observa el patrón de fractura debonding ya descrito anteriormente. En el punto 5 se observa el patrón de fractura “microbuckling” debido a la compresión generada por la herramienta de corte y el material compuesto.

En el círculo rojo se observa el patrón de fractura conocido como marcas de río el cual se presenta acompañando la liberación de energía por la fractura de la resina.

En el círculo celeste se muestra un patrón de fractura a compresión unidireccional llamado “Kink band” el cual puede ser debido al pandeo y fractura de las fibras frágiles [73], aunque también puede estar asociado al efecto de desfase producido por la compresión de las fibras según S.A. Tsampas y coautores [78].

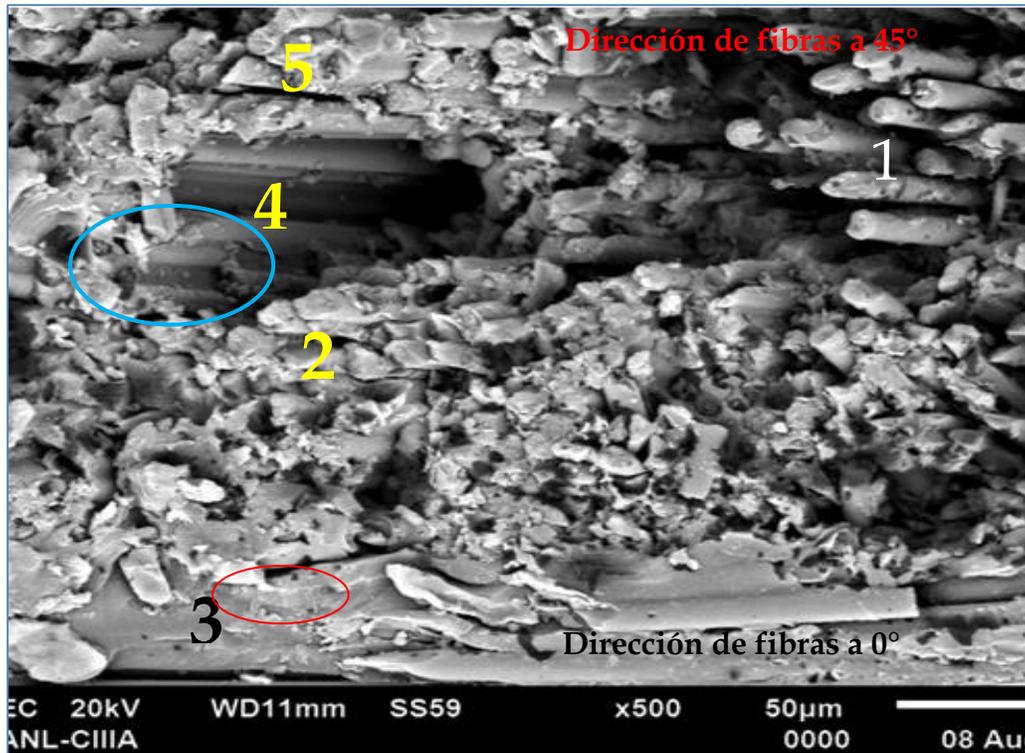


Figura 58.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinado en fresado:  $V_c=20000$  rpm,  $V_a=0.2$  mm/rev,  $L=2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500

## 5.2.2. Proceso de corte con disco de diamante policristalino

### Muestras de material compuesto reforzado con fibra de vidrio

En la figura 59 muestra una imagen a baja magnificación (35X) en la que se aprecia una buena calidad superficial con una rugosidad promedio entre  $0.15 \mu\text{m}$  y  $0.3 \mu\text{m}$  a lo largo del perfil; en el punto 1 se observa el arranque de fibras y resina favorecido por las altas velocidades de corte y avance de la herramienta, generando un hueco o cavidad característica a burbujas de aire, produciendo “debonding” como el micromecanismo de fractura a tensión.

En el punto 2, se observa un hueco, el cual pudo producirse por una alta concentración de resina como la apreciada en el punto 3.

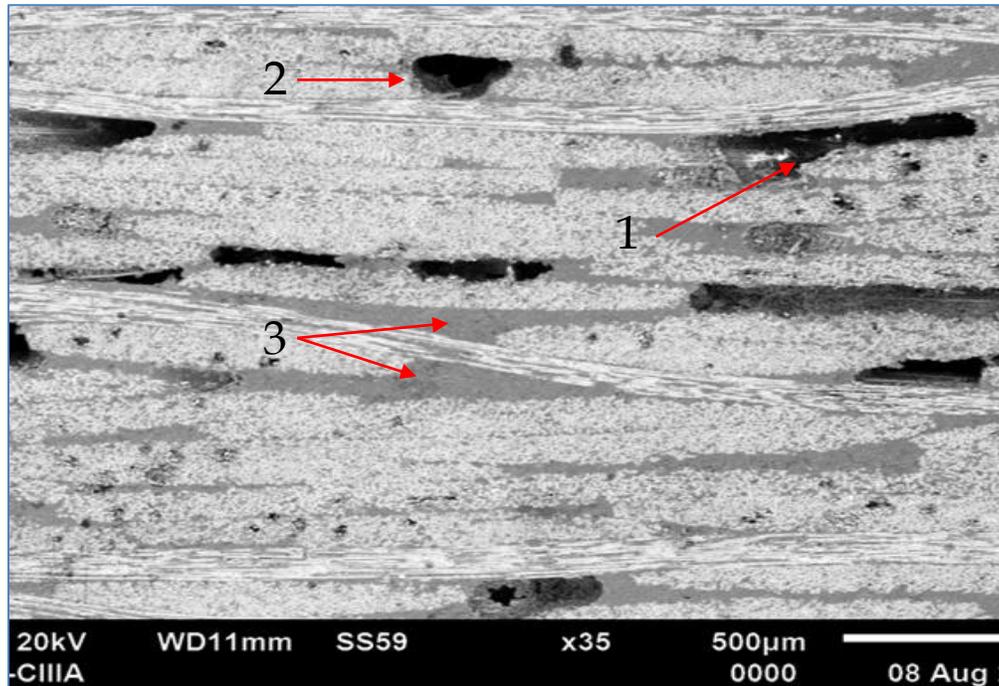


Figura 59.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en disco de diamante policristalino:  $V_c = 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 12 \text{ mm/rev}$ ,  $L = 1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados  $20 \text{ kV} \times 35$

En la figura 60 se muestra una imagen a alta magnificación, donde el punto 1 muestra el daño generado por el paso de la herramienta que se puede interpretar como una fractura inducida a nivel local. Es posible especular que la fricción que conlleva el roce de la herramienta con las fibras, produce una elevación de temperatura [40] que favorece flujo viscoso, lo que implicaría un curado incompleto, que se manifiesta como el embarramiento de la resina, que cubre la topografía local de fractura de las fibras, obteniéndose así una rugosidad superficial baja generando una calidad superficial buena.

En el punto 2 se observa el proceso de fractura combinado de tensión y compresión. En el punto 3 se observa una gran cantidad de resina indicando una buena adhesión del material al paso de la herramienta de corte.

En el punto 4 se observa el arranque del material estableciendo el patrón de fractura “debonding” generado por la tensión por la interacción de la herramienta con el

material al cortar. A su vez, al producir este patrón de fractura, se puede sumar la delaminación del material generando compresión a nivel local [79].

En el círculo rojo se observa el patrón de fractura conocido como marcas de río el cual se presenta acompañando la liberación de energía por la fractura de la resina.

En el círculo celeste se muestra un posible patrón de fractura a compresión unidireccional llamado "Kink band" el cual es debido al pandeo y fractura de las fibras frágiles [73] como también puede ocurrir debido al desplazamiento de las fibras por el esfuerzo de compresión, tal como lo discute S.A. Tsampas [78].

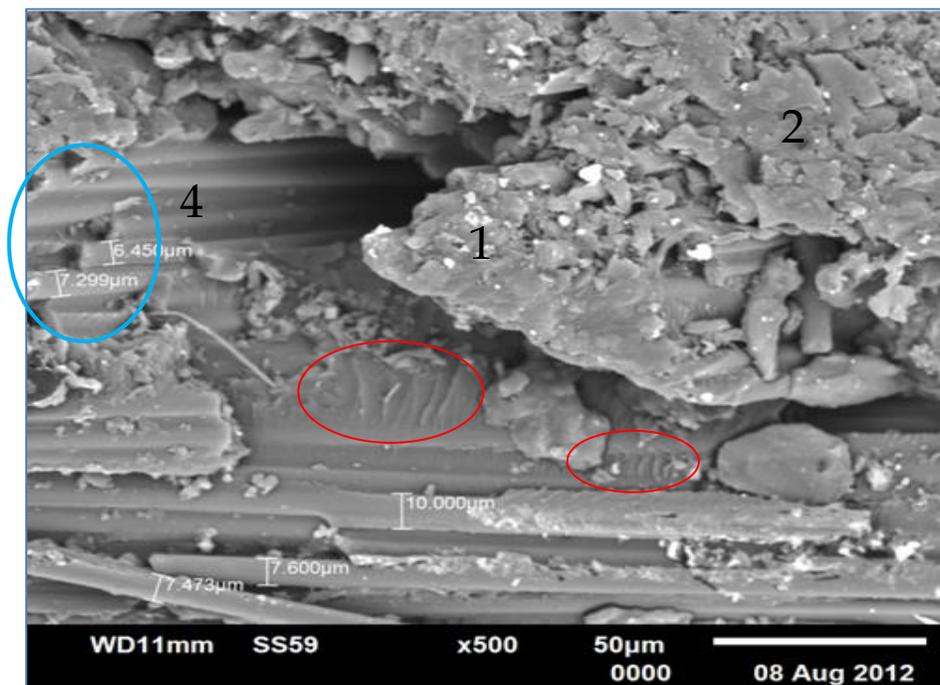
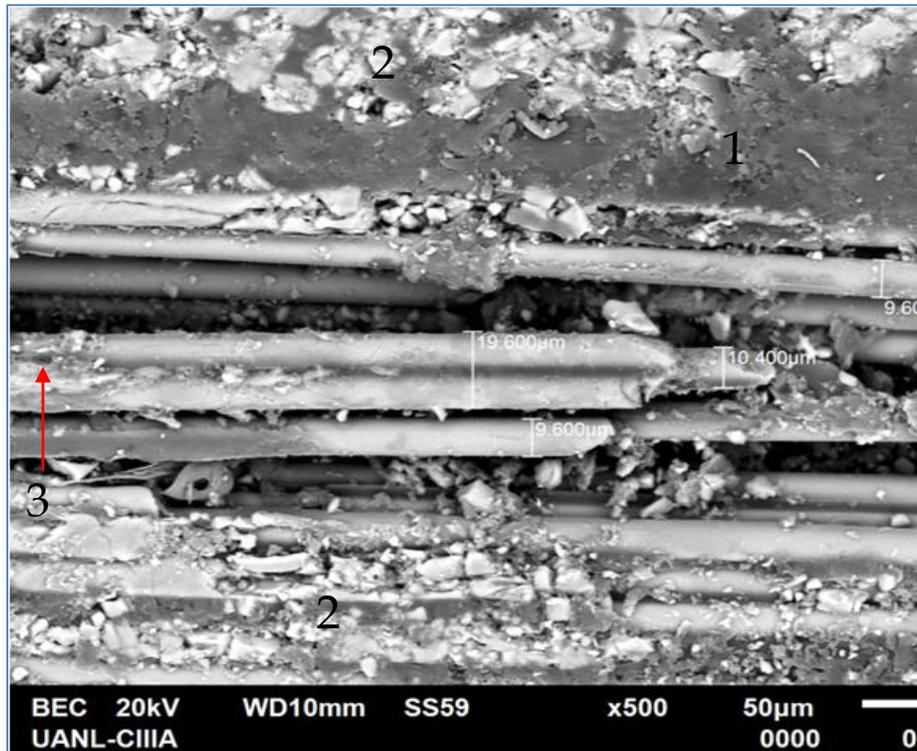


Figura 60.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en disco de diamante policristalino:  $V_c = 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 12 \text{ mm/rev}$   $L = 1$  Magnificación = Electrones retrodispersados  $20\text{kV} \times 500$

## Muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono

Si se considera solo la rugosidad, en la figura 61 se observa una excelente calidad superficial con una rugosidad promedio entre  $0.1 \mu\text{m}$  y  $0.25 \mu\text{m}$ , sin embargo se observan múltiples cavidades como las indicadas en el punto 1, lo cual se debe al arranque del material debido a la fractura local por tensión generada por el paso de la herramienta, esto se debe a una insuficiente adhesión entre las fibras y la resina produciendo la separación de las láminas direccionadas por “debonding”, esto es lo que normalmente se denomina delaminado. Se puede decir que este patrón no corresponde propiamente a una fractura local.

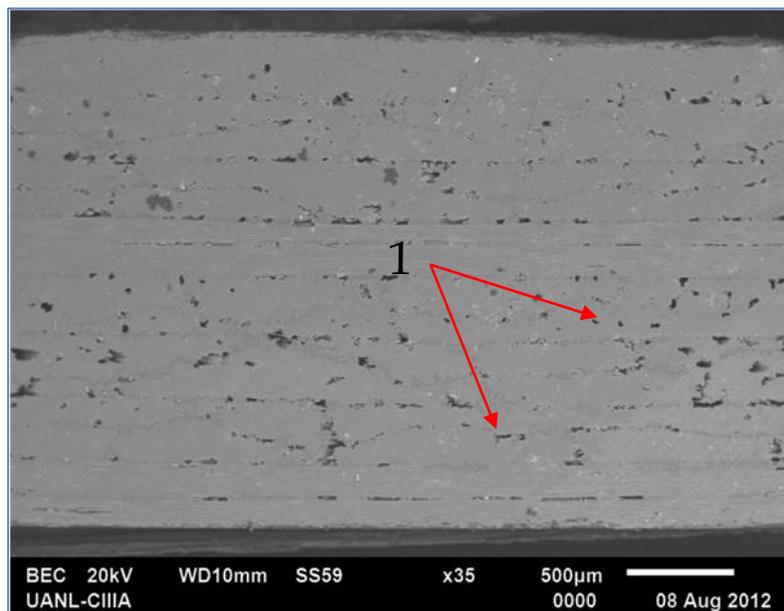


Figura 61.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de diamante policristalino:  $V_c = 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 12 \text{ mm/rev}$ ,  $L = 1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados  $20\text{kV} \times 35$

En la figura 62, se observa el mismo efecto de la imagen anterior, múltiples zonas de arranque de material debido a los efectos de fractura tensión - compresión, obteniendo una buena calidad superficial.

En el punto 1 se observa los daños o marcas producidas por el avance de la herramienta de corte comúnmente llamadas "streaks" [74].

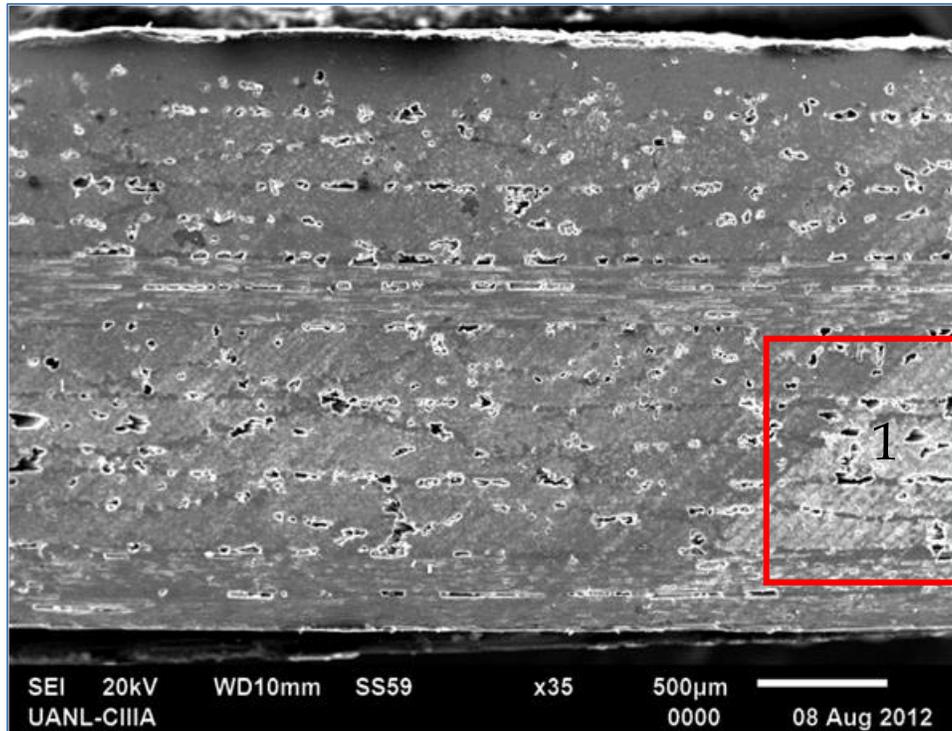


Figura 62.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de diamante policristalino:  $V_c= 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a= 12 \text{ mm/rev}$ ,  $L=1$ , Magnificación = Electrones secundarios 20kV x35

En la figura 63 se observa la imagen de una cavidad a mayor magnificación de la figura 61, obteniendo los mismos patrones observado en la figura 54, resaltando el modo de fractura a compresión en el punto 1 y modos mixtos (tensión - compresión) en el punto 2.

En el punto 3 muestra resina adherida en la superficie de la fibra. En el punto 4 se muestra el arranque del material asociado a la tensión generada por el paso de la herramienta.

Al surgir estos efectos combinados, la calidad superficial del material compuesto mejora obteniendo rugosidades bajas en comparación con el proceso de fresado.

En el círculo celeste se muestra un posible patrón de fractura a compresión unidireccional llamado "Kink band" el cual es debido al pandeo y fractura de las fibras frágiles [73].

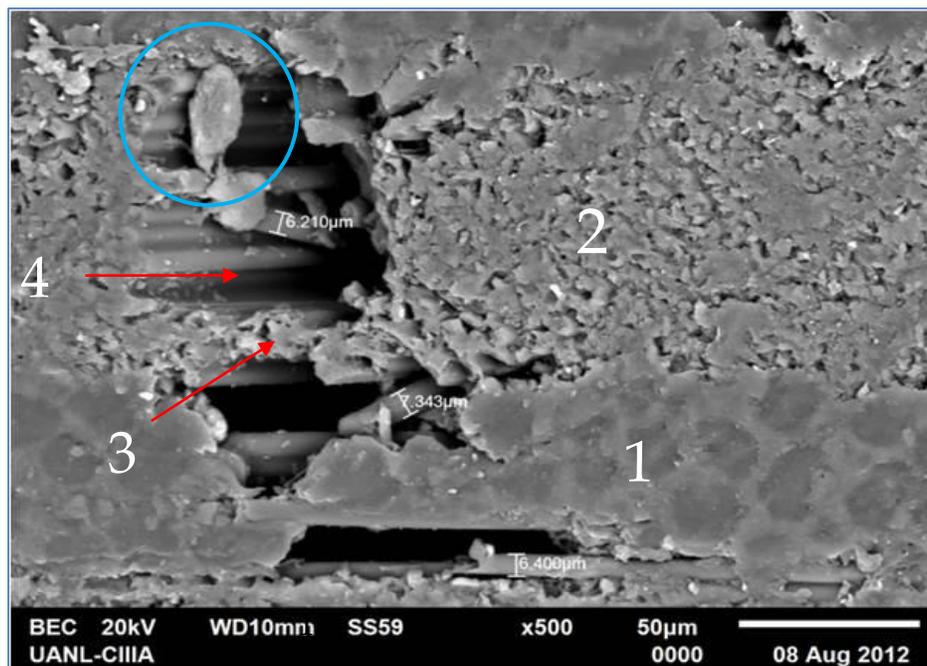


Figura 63.- Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de diamante policristalino:  $V_c = 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 12 \text{ mm/min}$ ,  $L = 1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados,  $20 \text{ kV} \times 500$

### **5.3. Comparación de procesos de maquinado en los materiales compuestos reforzados de fibra de vidrio - fibra de carbono**

#### **5.3.1. Proceso de fresado**

Los resultados discutidos muestran que en los materiales de fibra de vidrio y fibra de carbono se presentan dos modos de carga a nivel local: tensión y compresión. En el modo de tensión se generan propagación interlaminar, así como nucleación y propagación de grietas en la resina en forma transversal, mecanismo posiblemente favorecido por la insuficiente adhesión entre la fibra y la resina. Los patrones de fractura generados por ambos materiales son: Pull out y debonding. En el modo de compresión, se obtuvo el patrón de fractura microbuckling.

#### **5.3.2. Proceso de corte con disco de diamante policristalino**

En los materiales de fibra de vidrio y fibra de carbono muestran tres modos de carga: tensión, compresión y tensión - compresión.

En el modo de tensión se generan propagaciones de fractura interlaminar, generado por una ineficiente adhesión entre la fibra y la resina presentando como patrones de fractura debonding y marcas de río.

En las zonas con buena adhesión de la fibra y la resina la fractura a compresión generó un patrón de fractura de micropandeamiento o microbuckling. No se encontraron marcas o grietas donde se pudo haber propagado la fractura de forma interlaminar e intralaminar.

Ambos materiales obtuvieron la combinación de ambos patrones en un mismo lugar: tensión - compresión, debido a la fricción generada por la interacción de la herramienta de corte y el material compuesto, la resina presentó un efecto de embarramiento el cual se especula que se debe a la compresión de la resina y la fibra mediante el calentamiento de ambas al paso de la herramienta.

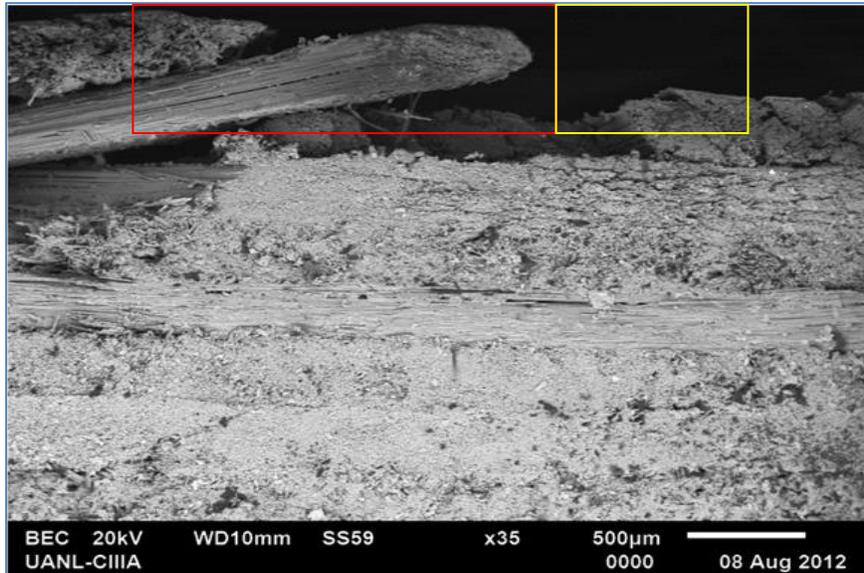
Se presenta una mejor calidad superficial al utilizar esta herramienta [80].

#### **5.4. Comparación fractográfica entre las superficies obtenidas por fractura en flexión tres puntos y las superficies maquinadas en muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono**

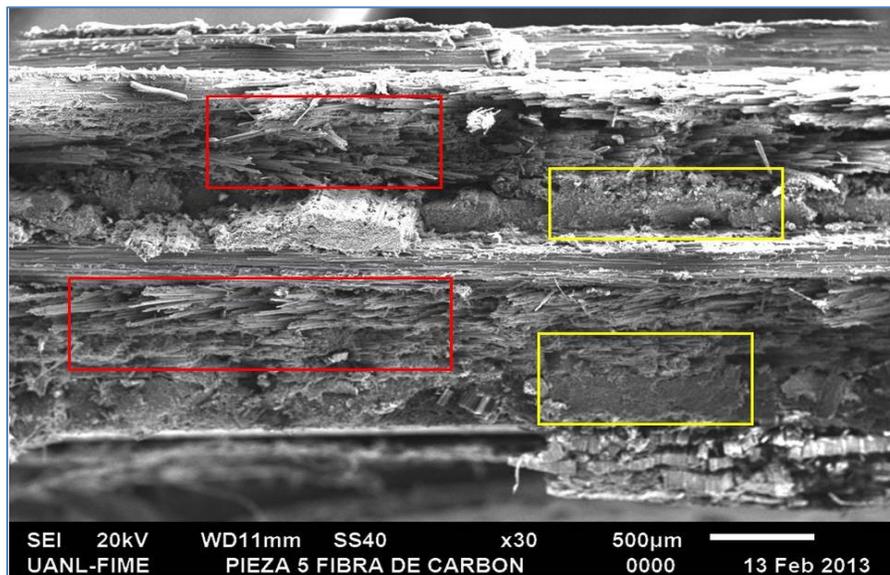
En esta sección, se comparará la fractura generada por medio de flexión a tres puntos [30] y un maquinado a base de un proceso de corte por medio del fresado y el disco de diamante.

En la figura 64 a, muestra en el recuadro rojo un desprendimiento de fibras, debido a la propagación de fractura de manera interlaminar (recuadro amarillo) para terminar de manera intralaminar en forma transversal en la fractura a tensión, obteniendo así una mala adhesión entre la resina y la fibra del material produciendo “debonding”.

La figura 64 b, muestra la fractura a flexión, la cual se observa en los recuadros rojos la fractura a tensión en las fibras y en amarillo la fractura a compresión. Se puede observar que en la zona roja, las fibras a  $+45^\circ$  se observan sin resina, lo cual indica una mala adhesión de ella sobre las fibras. En la zona amarilla, por la compresión generada en las fibras, causa un aplastamiento de ellas, lo cual se hace notar en las fibras orientadas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .



a)



b)

Figura 64.- Muestras de superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a) Maquinadas mediante herramienta de fresado:  $V_c = 20000 \text{ rpm}$   $V_a = 0.2 \text{ mm/rev}$ ,  $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35. b) Fracturada a flexión en 3 puntos: Magnificación = Electrones secundarios 20kV x30 [30]

En la figura 65, muestra la comparación entre los procesos de maquinado (a) y fractura a flexión en tres puntos (b y c), donde ambos procesos muestran esfuerzos combinados (tensión - compresión):

El recuadro amarillo, corresponde a fractura por compresión, el cual en ambos casos presenta el efecto “microbuckling” entre la resina y la fibra de la muestra presentando el mecanismo “Kink band” [73].

El recuadro rojo, corresponde a la fractura por tensión, la cual en ambos procesos presentan patrones de fractura “Pull-out” como también “debonding” debido a la propagación de la fractura en forma interlaminar e intralaminar.

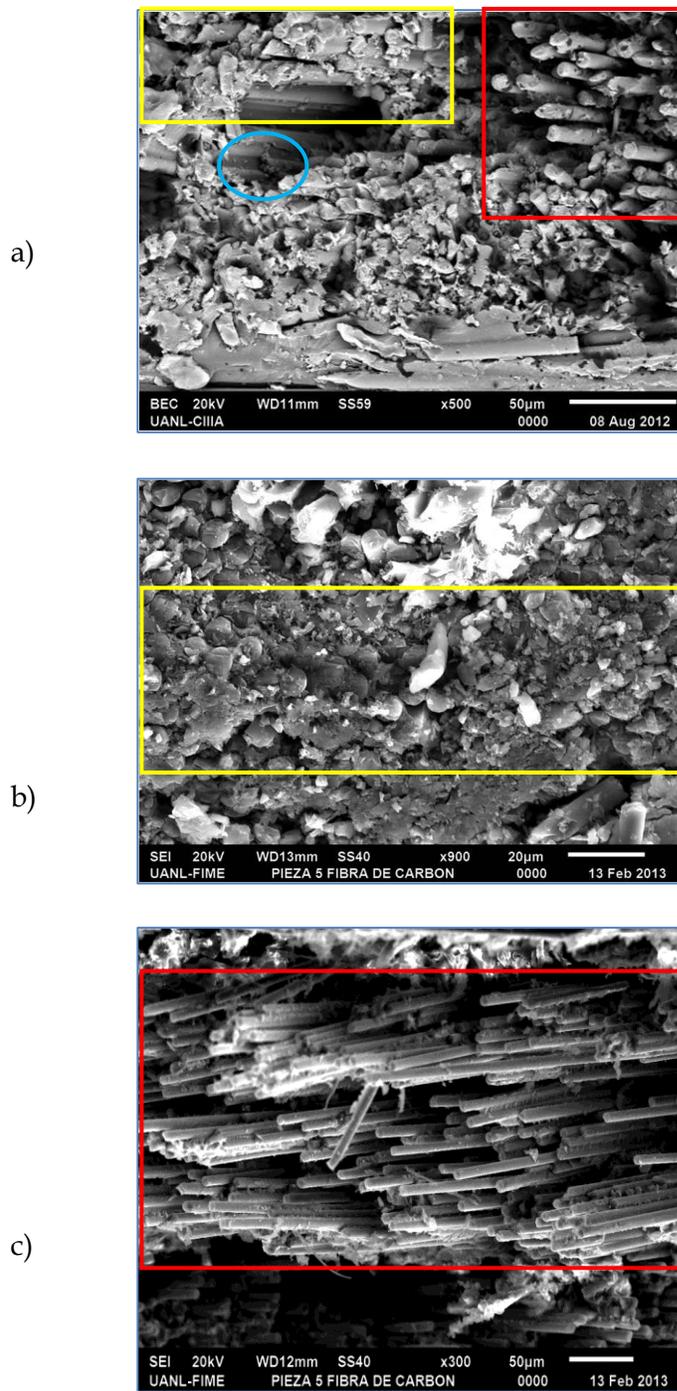


Figura 65.- Muestras de superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a) Maquinada mediante el fresado:  $V_c = 20000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 0.2 \text{ mm/rev}$ ,  $L = 2$ , Magnificación = Electrones Retrodispersados  $20\text{kV}$   $\times 500$ . b) Fractura a flexión en 3 puntos zona compresión: Magnificación = Electrones secundarios  $20\text{kV}$   $\times 900$  [30]. c) Fractura a flexión en 3 puntos zona tensión: Magnificación = Electrones secundarios  $20\text{kV}$   $\times 300$  [30].

En la figura 66, muestra la comparación entre los procesos de maquinado (a) y fractura a flexión en tres puntos (b y c), donde ambos procesos muestran evidencia de esfuerzos combinados (tensión - compresión).

El recuadro amarillo, corresponde a fractura por compresión, el cual en ambos casos presenta el efecto "microbuckling" entre la resina y la fibra de la muestra, mostrando una mejor calidad superficial la figura 66 a [73].

El recuadro rojo, corresponde a la fractura por tensión, donde la figura 66c muestra como patrón característico de fractura "Pull-out" y la figura 66a, muestra zonas de desprendimientos debido al patrón de fractura "debonding".

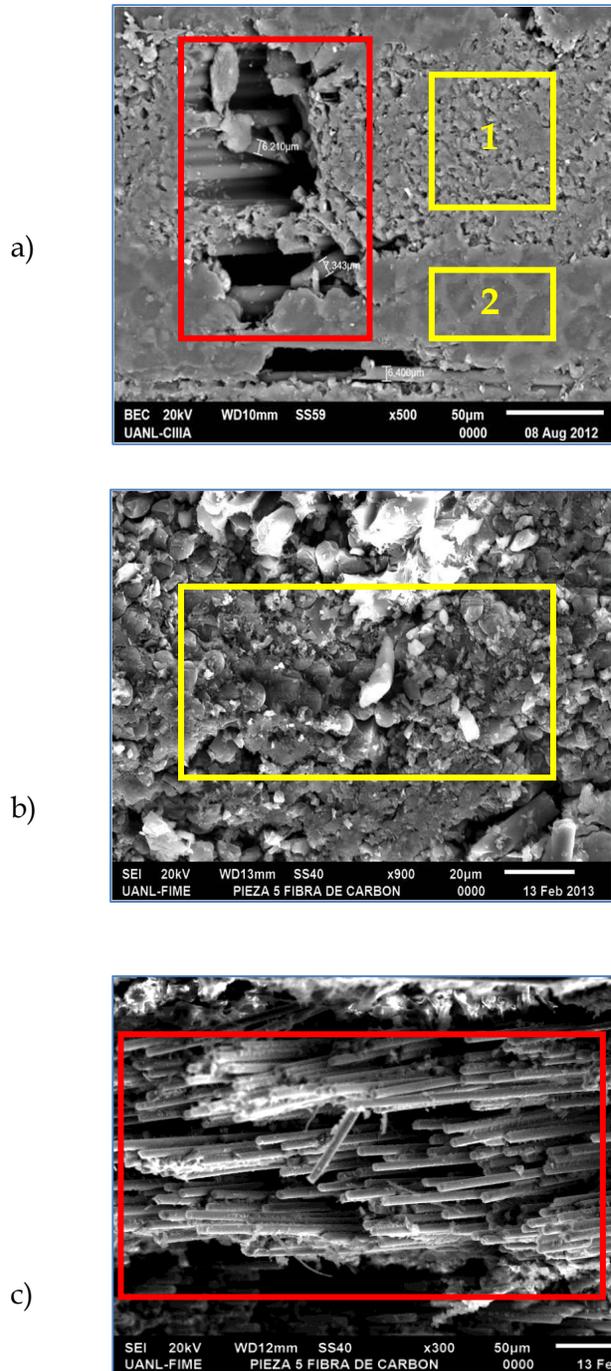


Figura 66.- Muestras superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a) Maquinada mediante disco de diamante:  $V_c = 5000 \text{ rpm}$ ,  $V_a = 12 \text{ mm/min}$ ,  $L = 1$ , Magnificación =Electrones retrodispersados  $20 \text{ kV} \times 500$ . b) Fractura a flexión en 3 puntos zona compresión: Magnificación = Electrones secundarios  $20 \text{ kV} \times 900$  [30]. c) Fractura a flexión en 3 puntos zona tensión: Magnificación = Electrones secundarios  $20 \text{ kV} \times 300$  [30].

## Capítulo 6. Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se emiten las siguientes conclusiones:

1. La rugosidad presente en los materiales estudiados tanto para la fibra de vidrio como la fibra de carbono muestran una calidad superficial buena debido a que la rugosidad es menor al diámetro de la fibra. Los análisis estadísticos en el proceso de fresado muestra daño superficial elevado mediante la asimetría positiva obteniendo rugosidades altas  $0.8 \mu\text{m} - 2.2 \mu\text{m}$  para fibra de vidrio y  $0.2 \mu\text{m} - 1.6 \mu\text{m}$  para fibra de carbono mientras para el proceso de corte con diamante policristalino muestra tendencias combinadas positiva - estándar obteniendo una mejor calidad superficial  $0.1 \mu\text{m} - 0.4 \mu\text{m}$  para la fibra de vidrio y  $0.1 - 0.2 \mu\text{m}$  para la fibra de carbono.
2. La herramienta de disco de diamante policristalino muestra un mejor desempeño en relación a la calidad superficial generada por los métodos de corte.
3. En el fresado del material de fibra de vidrio se obtiene una mejor calidad superficial al tratarlo en el sentido 2 con  $V_c$  de 14400 rpm y  $V_a$  de 0.2 mm/rev.
4. En el fresado del material de fibra de carbono se obtiene una mejor calidad superficial al tratarlo en el sentido 1 con  $V_c$  de 14400 - 20000 rpm y  $V_a$  de 0.2 mm/rev.
5. El análisis de las superficies maquinadas mediante criterios de fractografía indica que los patrones de fractura sobre la superficie maquinada como son las propagaciones interlaminares, así como la nucleación y la propagación de grietas de la resina en forma transversal evidencian el proceso de maquinado como un daño superficial controlado comparable a la fractura localizada a nivel local.

## 6.2. Proceso de fresado

### Muestras de material compuesto reforzado con fibras de vidrio

#### Sentido de corte 1

- La rugosidad superficial disminuye al incrementar la velocidad de corte
- No se observa una variación sistemática de la rugosidad respecto a la velocidad de avance en el sentido 1.

#### Sentido de corte 2

- No se observa una variación sistemática de la rugosidad respecto a la velocidad de corte.
- Para una velocidad de corte de ( $V_c$ ) 9500 rpm la rugosidad superficial aumenta al incrementar la velocidad de avance ( $V_a$ ).
- Para una velocidad de corte ( $V_c$ ) de 14400 m/min la rugosidad superficial disminuye al incrementar la velocidad de avance ( $V_a$ ).

### Muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono

- La rugosidad superficial aumenta al incrementar la velocidad de corte.
- Para una velocidad de corte ( $V_c$ ) de 9500 rpm y 14400 rpm, la rugosidad superficial aumenta al incrementar la velocidades de avance ( $V_a$ ).
- Para la velocidad de corte ( $V_c$ ) de 20000 rpm en sentido 1, no se observa una variación sistemática de la rugosidad respecto a la velocidad de avance en comparación con el sentido 2.
- Para una velocidad de avance ( $V_a$ ) de 0.2 mm/rev, todas las velocidades de corte ( $V_c$ ) generan una rugosidad superficial dentro de la clasificación polish - ground (0.2  $\mu\text{m}$  - 0.4  $\mu\text{m}$ ).

### 6.3. Proceso de corte con disco de diamante policristalino

#### Muestras de material compuesto reforzado con fibras de vidrio

- No se observa una variación sistemática de la rugosidad respecto a la velocidad de avance.

#### Muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono

- La rugosidad superficial aumentar al incrementar la velocidad de avance.

### 6.4. Análisis del daño superficial

- Por primera ocasión, hasta donde el autor tiene conocimiento, se documenta el fenómeno de *embarramiento* causado por la compresión de las fibras y la resina al paso de la herramienta de corte de diamante policristalino.
- Se presentaron características de fractura en forma intralaminar, interlaminar, mala adhesión entre las fibras y la resina.
- Se presentaron patrones de fractura como son: *debonding*, zonas *mirror* o espejo, *mist* o difusa, *pull-out* y *microbuckling*.

#### 6.4.1. Comparación entre proceso de fractura a flexión en 3 puntos - maquinado en muestras de material compuesto reforzado con fibra de carbono.

- Ambos procesos de fractura (maquinado - flexión a tres puntos) muestran evidencia local de esfuerzos de compresión y tensión, como también los mismos patrones de fractura como son: "*debonding*", "*mirror* o espejo, *mist* o difusa", "*pull-out*", "*microbuckling*".
- De acuerdo a las conclusiones anteriores, el autor está convencido de que este trabajo colabora al desarrollo de capacidades para comprender los aspectos físicos presentes en la interacción del material compuesto con la herramienta de corte como sus patrones de fractura, con lo cual se cumple el objetivo general de este proyecto.

## **6.5. Trabajo a futuro**

Se propone analizar la rugosidad de las superficies maquinadas mediante técnicas avanzadas de caracterización de topografía en base a un microscopio de fuerza atómica para lograr un análisis fractal o autoafín a las diversas escalas de rugosidad.

Se recomienda realizar técnicas no destructivas para analizar la porosidad presente en los materiales compuestos.

Se sugiere abordar modelos matemáticos para los resultados de rugosidad promedio, velocidad de corte y velocidad de avance, que permitan una mejor interpretación de dichos resultados, así como la correlación que existe con los parámetros de maquinado.

## Referencias

- 1 **ASM International Handbook**; *"ASM Handbook volume 21 Composites"*. 2001.
- 2 **F.C. Campbell**; *"Manufacturing technology for aerospace structural materials"*, 2006 Elsevier. p. 5, 274,379.
- 3 **Sanjay K. Mazumdar, Ph.D**; *"Composites manufacturing, materials, product and process engineering"*, 2002 by CRC Press LLC.
- 4 **Aeroespacial, FEMIA Federación Mexicana de la Industria**; *"Pro-Aéreo 2012-2020 Programa Estratégico de la Industria Aeroespacial"*.
- 5 **Griffiths Brian**; *"Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance"*, Penton Press, 2001.
- 6 **Field y Kahles, 1964**; *"Review of surface Integrity of Machined Components"*, Annals of the CIRP 1971 pp. 153-163.
- 7 **Montero Laura**; *"Estudio del mecanizado de materiales compuestos"*, Universidad Carlos III de Madrid. Tesis de ingeniería, 2010.
- 8 **Lasri Larbi**, *"Modélisation macromécanique et micromécanique de l'usinage des composites à matrice polymère et fibres longues"*, Tesis doctoral, Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- 9 **Paris F, Cañas J.**; *"Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos"*, Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Grupo de elasticidad y resistencia de materiales. 2006.
- 10 **C Donoso E**; *"Materiales de Ingeniería – Materiales compuestos"*.
- 11 **Surinder Kumar<sup>1</sup>, 2012**; *"Cutting forces optimization in the turning of UD-GFRP composites under different cutting environment with polycrystalline diamond tool"*, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 4, No. 2, 2012,

pp. 106-121.

- 12 **Inderdeep Singh**; *“Secondary Processing of Polymer Matrix Composites”*, Composites Processing-2004, Bromsgrove, UK.
- 13 **Cabrera Mata**; *“Aportación al maquinado de los plásticos reforzados”*, Departamento de Mecánica Aplicada, Universidad de Castilla-La Mancha, 2005.
- 14 **Ciencia y desarrollo CONACYT**; *“Los materiales compuestos y su desarrollo actual”*, 2010.
- 15 **Carbajales Ramón, Inspector Naval**; *“Materiales compuestos de matriz polimerica reforzados con fibra”*.
- 16 **Luna Ruben de Blas**; *“Análisis paramétrico del corte ortogonal de materiales compuestos mediante modelización numérica”*, Universidad Carlos III de Madrid. Tesis de ingeniería, 2010.
- 17 **Carbon Concrete**; *“refuerzos de estructura de hormigón”*, Material compuesto, 2008.
- 18 **Mata Francisco**; *“Modelos físicos y estadísticos para la caracterización del mecanizado de los materiales compuestos de matriz termoplástica”*, Universidad de Aveiro, 2008.
- 19 **Davim J. Paulo, Reis Pedro**; *“Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments”*, Journal of Materials Processing Technology 160, 2005, 160-167.
- 20 **Herring M.L**; *“The effect of material selection and manufacturing process on the surface finish of carbon fibre composites”* ELSEVIER Journal of Materials Processing Technology, 2010, 926-940.
- 21 **Herring M.L**; *“The effect of a rapid curing process on the surface finish of a carbon fibre epoxy composite”*, ELSEVIER Composites: Part B, 2011, 1035-1043.
- 22 **An San-Okk**; *“A study on the cutting characteristics of glass fiber reinforced plastics”*

- with respect to tool materials and geometries*", ELSEVIER, 1995, 60-67.
- 23 **Mikell P. Groover**; *"Fundamentos de manufactura moderna"*, Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company, 1997.
  - 24 **Dieter, George**; *"Mechanical Metallurgy"*. s.l. : McGraw-Hill, 1976.
  - 25 **William D. Callister, Jr.**; *"Materials Science and Engineering"*, EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. pp. 212,213,214.
  - 26 **S. Sadaba, C. Gonzalez, J. LLorca**; *"Failure simulation in laminates of fiber-reinforced composites"*, Madrid, España: s.n., 2008.
  - 27 **Hiley, E. S. Greenhalgh and M. J.**; *"Fractography of polymer composites: current status and future issues"*, London, UK : s.n.
  - 28 **Masa Suresh Kumara, Kesarabandi Raghavendraa, Magalapalaya Anjanappa Venkataswamy**; *"Fractographic Analysis of Tensile Failures of Aerospace Grade"*.
  - 29 **Ding, Wei**; *"Delamination Analysis of Composite Laminates"*, 1999. p. 17.
  - 30 **Rodríguez Carlos Alfonso**;" *Patrones Y Mecanismos De Fractura En Los Materiales Compuestos De Matriz Polimérica Reforzados Con Fibras"*, Tesis maestría Universidad Autónoma de Nuevo Leon, 2013.
  - 31 **Hull, Derek**; *"Fractography, Observing, Measuring and interpreting fracture surface topography"*, United Kingdom : Cambridge University Press, 1999.
  - 32 **Dessarthe Alain** ; *"Usinage des composites à matrice polymère"*. - Techniques de L'ingenieur, 2012.
  - 33 **Hanafi Issam**; *"Fuzzy rule based predictive model for cutting force in turning of reinforced PEEK composite"*, Elsevier, 2012.
  - 34 **Chennakesavelu Ganesh**; *"Orthogonal machining of uni-directional carbon fiber reinforced polymer composites"*, Bachelor in Engineering, Golden Valley Institute of

- Technology, 2010.
- 35 **Sorrentino L:** *“Milling of carbon fiber-reinforced plastics: analysis of cutting forces and surface roughness”*, 18TH International conference on composite materials, 2011.
- 36 **Lou Mike Dr;** *“Surface roughness prediction technique for CNC end-milling”*, Journal of industrial, 1999, volume 15.
- 37 **Aguilera Alfredo;** *“Cinemática del proceso de fresado de Acacia melanxylon R. Br. Su efecto sobre calidad superficial y consumo de energía”*, Tesis ingeniería, Universidad austral de Chile, 2006.
- 38 **Nieminen I ;** *“High-speed milling of advanced materials”*, Journal of Materials Processing Technology 56, 1996, 24–36.
- 39 **Kalla Dervi;** *“Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers”*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 50, 2010, 882–891.
- 40 **Palanikumar K, Davim J. Paulo;** *“Assessment of some factors influencing tool wear on the machining of glass fibre-reinforced plastics by coated cemented carbide tools”*, journal of materials processing technology 209, 2009, 511–519.
- 41 **Altat Hussain Syed;** *“Machinability of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials”*, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 3, No. 4, 2011, pp. 103-118.
- 42 **Kumar Surinder;** *“Optimization of surface roughness in turning unidirectional glass fiber reinforced plastics (UD-GFRP) composites using polycrystalline diamond (PCD) cutting tool”*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 19, June 2012, pp. 163-174.
- 43 **Hintze Wolfgang;** *“Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study”*, Elsevier,

Composites Science and Technology 71, 2011, 1719–1726.

- 44 **Aranda Bulmaro;** *“Desarrollo de un modelo semi-empírico para la selección de parámetros de corte en el fresado a través de criterios de restricción de integridad superficial”*, Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.2007.
- 45 **Hinojosa Moisés, Reyes Martin;** *“La rugosidad de las superficies: Topometría”*, Ingenierías, Abril - Junio 2001, Vol. IV, No. 11.
- 46 **Suhail Adeel;** *“Optimization of Cutting Parameters Based on Surface Roughness and Assistance of Workpiece Surface Temperature in Turning Process ”*, American J. of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3 (1): 102-108.
- 47 **Vesselenyi Tiberiu;** *“Surface Roughness Image Analysis using Quasi-Fractal Characteristics and Fuzzy Clustering Methods”*, Int. J. of Computers, Communications & Control, ISSN 1841-9836, E-ISSN 1841-9844 Vol. III, 2008, No. 3, pp. 304-316.
- 48 **Palanikumar K;** *“Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology”*, Elsevier, Materials and Design 28, 2007, 2611–2618.
- 49 **Davim J. Paulo, Reis Pedro;** *“A study on milling of glass fiber reinforced plastics manufactured by hand-lay up using statistical analysis (ANOVA)”*, Elsevier, Composite Structures 64, 2004, 493–500.
- 50 **Rai Ashok;** *“Evaluation of milling parameters on fiberglass to reduce the surface roughness”*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2013, Vol. 2.
- 51 **Zhang Jianbo;** *“Monitoring of dry sliding wear using fractal analysis”*, University of Twente, Department of Electrical Engineering, 2004.

- 52 **Petropoulos G.P;** *Multi-parameter analysis and modelling of engineering surface texture*", *AMME Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, VOLUME 24.
- 53 **Lara Yareni;** *"Escalamiento de la rugosidad en superficies maquinadas de un compósito de matriz polimérica."*Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León, (2012 - en proceso).
- 54 **Eriksen Else;** *"Influence from production parameters on the surface roughness of a machined short fibre reinforced thermoplastic"*, *Pergamon International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 1611-1618.
- 55 **Davim Paulo J;** *"Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components"*, *ELSEVIER*, 2003, 67-73.
- 56 **Technol Sci Mater.J;** *"Optimizing the Machining Parameters for Minimum Surface Roughness in Turning of GFRP Composites Using Design of Experiments"*, *Research Articles*, 2001, Vol.20.
- 57 **Davim J, Reis Pedro;** *"Machinability study on composite (polyetheretherketone reinforced with 30% glass fibre-PEEK GF 30) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K20) tools"*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (impact factor: 1.1), 2004, 23, 412-418.
- 58 **Khan Adam M;** *"Machinability of glass fibre reinforced plastic (GFRP) composite using alumina-based ceramic cutting tools"*,*ELSEVIER Journal of Manufacturing Processes*, 2011, 67-73.
- 59 **Wang, X.M;** *"An experimental investigation into the orthogonal cutting"*, *Pergamon*, 2003, 1015-1022.
- 60 **Mata Francisco;** *" Influence of cutting conditions on machinability aspects*

- of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools", ELSEVIER, 2009, 1980–1987.
- 61 **Hexcel. HexPly® ESEH84 curing epoxy matrix.** 2010.
- 62 **Hexcel. HexPly® M21 curing epoxy matrix.** 2010.
- 63 **Gong X.J;** "On the determination of delamination toughness by using multidirectional DCB specimens", Polymer testing, volume 29, Issue 6, September 2010, Pages 658–666.
- 64 **F.C. Campbell;** "Manufacturing Processes for Advanced Composites". Elsevier, 2004, p3, Fig. 2.
- 65 **Mulle M;** " Assessment of cure residual strains through the thickness of carbon–epoxy laminates using FBGs, Part I: Elementary specimen", ELSEVIER Composites: Part A, 2009, 94–104.
- 66 **Palanikumar K.;** "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber reinforced polymer composites", Materials & Desing, Volume 27, Issue 10, 2006, Pages 862–871.
- 67 **Petropoulos G;** "Statistical study of surface roughness in turning of peek composites", ELSEVIER Technical Report, 2008, 218–223.
- 68 **Fetecau Catalin;** " Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool", 2012.
- 69 **A. Jumahat, C. Soutis;** "Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading", Composite Structures 92 (2010) 295–305.
- 70 **Carlos Santiuste, Xavier Soldani;** "Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components". Composite Structures 92 (2010) 691–698.

- 71 **Himayat Ullah, Andy R. Harland;** *"Damage and fracture in carbon fabric reinforced composites under impact bending"* *Composite Structure* 101,( 2013), 144-156.
- 72 **Harris, Bryan;** *"Engineering composites"*, 1999. p. 105.
- 73 **Issac M. Daniel, Ori Ishai;** *"Engineering mechanics of composite materials"*, Oxford University Press, Inc 2006, (P. 107, 113).
- 74 **W Koenig, Ch. Wulf;** *"Machining of fiber reinforced plastics"* *CIRP Annals*, 34 (2) (1985), pp. 537-547.
- 75 **Vinod Srinivasaa, Vinay Shivakumara, Vinay Nayakaa, Sunil Jagadeeshaiiha, Murali Seethrama, Raghavendra Shenoya, Abdelhakim Nafidie;** *"Fracture Morphology of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates"*, India : s.n., 2010. p. 7.
- 76 **V.J. Hawyees, P.T. Curtis;** *"Effect of impact damage on the compressive response of composite laminate"*. *Composites Part A* 32A (2001) 1263 - 1270.
- 77 **K.L. Rugg, B.N. Cox;** *"Damage mechanisms for angled through-thickness rod reinforcement in carbon-epoxy laminates"*. *Composites Part A* 29A (1998) 1603-1613.
- 78 **S.A. Tsampas, E.S. Greenhalgh;** *"On compressive failure of ultidirectional fibre-reinforced composites: A fractographic study"*. *Composites: Part A* 43 (2012) 454-468.
- 79 **S.L. Lemanski, J. Wang;** *"Modelling failure of composite specimens with defects under compression loading"*. *Composites: Part A* 48 (2013) 26-36
- 80 **M. Haddad, H. Bougherara;** *"Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior"* *Composites: Part B* 57 (2014) 136-143.

## Apéndice A

En la siguiente tabla, se muestra los aspectos y parámetros más importantes dentro de la literatura estudiada.

**Tabla 22.- Resumen de los aspectos y parámetros más importantes de la literatura estudiada**

Referencia	Autor	Maquinado	Fibra	Matriz	Herramienta de corte	La rugosidad	Parámetros	La rugosidad	Parámetros
54	Eriksen	Torneado	Vidrio	SAN	WC	Aumenta	Aumenta Va	Disminuye	Orientación aumenta
55	Paulo Davim	Torneado	Vidrio	PEEK	PCD	Aumenta	Aumenta Va	Disminuye	Aumenta Vc
56	Palanikumar	Torneado	Vidrio		TiC	Aumenta	Aumenta Vc		
48	Palanikumar	Torneado	Vidrio	GFRP	k12	Aumenta	Aumenta Va	Disminuye	Aumenta Vc
48	Palanikumar	Torneado	Vidrio	GFRP	k12	Aumenta	Orientación aumenta	Disminuye	Prof. corte Aumenta
41	Hussain	Torneado	Vidrio	Epoxi	K20 BN PCD	Aumenta	Aumenta Vc	Aumenta	Aumenta Va
42	Kumar	Torneado	Vidrio		PCD	Aumenta	Aumenta Va	Aumenta	Aumenta Vc
38	Nieminen	Fresado	Vidrio	GFRP	PCD	Aumenta	Aumenta Vc		
50	Ashok Rai	Fresado	Vidrio	GFRP	K	Disminuye	Aumenta Va	Aumenta	Aumenta Diámetro de la Herramienta
38	Nieminen	Fresado	Carbono	CFRP	PCD	Aumenta	Aumenta Vc		
59	Wang y Zhang	Torneado	Carbono	CFRP		Disminuye	Prof. corte disminuye		
19	Davim y Reis	Torneado	Carbono	CFRP	K10	Aumenta	Aumenta Va	Disminuye	Aumenta Vc
60	Francisco Mata	Torneado	Carbono	CFRP	PCD	Aumenta	Aumenta Va		
35	Sorrentino y Turchetta	Fresado	Carbono	epoxi	K	Aumenta	Aumenta Va	Disminuye	Disminuye Va
35	Sorrentino y Turchetta	Fresado	Carbono	epoxi	K	Aumenta	Aumenta Vc		
40	Palanikumar y Davim	Torneado	Vidrio	Epoxi	K	Aumenta	Aumenta Vc	Aumenta	Aumenta Va

## Apéndice B

### Análisis estadístico de asimetría y curtosis

En esta sección, se detallara el análisis correspondiente a las piezas de fibra de vidrio y fibra de carbono, donde se tomaran conceptos básicos como son la asimetría positiva, negativa y curtosis.

### Parámetros y herramientas de corte para análisis estadístico

Los materiales a analizar en esta sección son las fibras de vidrio y carbono, el cual se llevó a cabo mediante el proceso de fresado y disco de diamante policristalino bajo los parámetros de la Tabla 22.

Tabla 23.- Parámetros y herramientas de corte para análisis estadístico

	Fresado	Diamante policristalino
Velocidad de corte (Vc)	20000 rpm	5000 rpm
Velocidad de avance (Va)	0.2 mm/rev	12 mm/rev
Dirección de corte (Avance de herramienta)	Sentido: L1 -L2 (positivo - negativo)	L1 - L2
Posición de medición	P1 -P2 - P3	P1 - P2 - P3

### Resultados estadísticos de las muestras de material compuesto reforzado con fibras de vidrio

#### Proceso de Fresado

Sentido	Estadística	P1	P2	P3
L1	Simetría	Positiva	Positiva	Positiva
	Curtosis	Estándar	No estándar	No estándar
L2	Simetría	Positiva	Positiva	Positiva
	Curtosis	No estándar	Estándar	No estándar

Se puede apreciar, que tanto en la dirección de corte 1 y 2, se muestra una asimetría positiva, indicando que la mayoría de los datos recopilados por medio del rugosímetro, muestra una altura promedio.

### Proceso de corte con disco de diamante policristalino

Sentido	Estadística	P1	P2	P3
L1	Simetría	Estándar	Positiva	Positiva
	Curtosis	No estándar	No estándar	No estándar
L2	Simetría	Positiva	Negativa	Estándar
	Curtosis	Estándar	No estándar	No estándar

En el P1, se puede observar que para L1 se tiene una simetría estándar y para L2 una curtosis estándar, lo cual se puede deducir, que en este punto se puede obtener un perfil adecuado para maquinar la pieza.

En el P2, en ambos casos, no cumple el límite estándar, teniendo una asimetría tanto positiva para L1 como negativa para L2. La curtosis en ambos casos esta fuera del parámetro estándar. Dentro de la simetría, se deberá realizar más pruebas para definir la orientación de la simetría.

En el P3, se tiene que para L1 su asimetría es positiva mientras que para L2 su simetría es estándar. Dentro de este campo de estudio, se deberá realizar más pruebas experimentales para definir la orientación de la simetría.

## Resultados estadísticos de las muestras de material compuesto reforzado con fibras de carbono

### Proceso de fresado

Sentido	Estadística	P1	P2	P3
L1	Simetría	Positiva	Positiva	Positiva
	Curtosis	No estándar	No estándar	No estándar
L2	Simetría	Estándar	Positiva	Negativa
	Curtosis	No estándar	Estándar	Estándar

Durante el maquinado bajo estas condiciones, se puede observar que se tiene una mejor estadística bajo la dirección de corte L2 debido a la simetría positiva, negativa y estándar. Como también, la curtosis muestra parámetros estándares.

Se puede monitorear una velocidad variable de inicio para obtener mejores condiciones de rugosidad, ya sea disminuyendo la velocidad al momento de iniciar el corte para después aumentarla y mantenerla a la velocidad propuesta.

### Proceso de corte con disco de diamante policristalino

Sentido	Estadística	P1	P2	P3
L1	Simetría	Positiva	Estándar	Positiva
	Curtosis	No estándar	No estándar	No estándar
L2	Simetría	Positiva	Estándar	Estándar
	Curtosis	No estándar	Estándar	Estándar

Dentro de estos parámetros de maquinado, se pueden obtener rugosidades buenas debido al tiempo que la herramienta genera al momento de cortar la pieza a lo largo del perfil maquinado.

Se muestran asimetrías estándares en ambos casos, pudiendo generar una buena distribución de alturas entre las fibras.

## Apéndice C

### Modelo Matemático

Se propone relacionar la rugosidad promedio por puntos de la pieza con el modelo matemático en base a la ley de potencia. Donde la fórmula característica de dicha ley de potencia es:

$$y = a x^b \quad \text{Ec 4}$$

Acoplando la fórmula de potencia en relación a la rugosidad, tenemos que:

$$Ra = K Va^n \quad \text{Ec. 5}$$

Donde K corresponde a la constante la cual mediante el programa de OriginPro8 automáticamente despliega junto con los valores de n, la cual corresponde la curvatura característica de la ley de potencia, la cual se muestra en la figura 62.

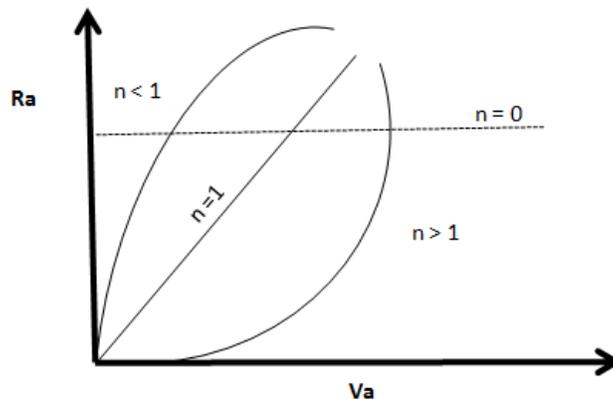


Figura 67.- Gráfica representativa de la ley de potencia donde n corresponde a la elevación de potencia del valor Va.

La ley de potencia viene relacionada bajo el parámetro  $R^2$ , el cual nos indica el ajuste de los datos rugosimétricos hacia la ley de potencias, la cual se encuentra entre los valores 0 y 1, el cual, mientras  $R^2$  tienda a acercarse hacia 1, el ajuste del modelo estará considerado como “bueno”.

Mientras más valores tengamos para relacionar los datos hacia el modelo matemático, el ajuste será más acertado, bajo este concepto y en nuestra investigación, los valores rugosimétricos son pocos en relación a los necesarios, el cual, se tendrá una tendencia negativa hacia el valor de  $R^2$ .

En las Tablas 23, 24 y 25, muestran los resultados correspondientes a la ley de potencias aplicado hacia las muestras de fibra de vidrio y fibra de carbono sobre los puntos de medición P2 y P3, ya que aplicando dicho modelo, el ajuste fue más cercano en comparación al punto P1.

**Tabla 24.- Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de fibra de vidrio**

Maquinado	Vc (Velocidad de corte) rpm	Sentido L1 - L2	Punto de medición P	Ajuste al modelo R <sup>2</sup>	a cte	b potencia
Fresado	9500	1	2	0.99949	1.28759	-0.1050
			3	0.59198	2.54337	0.14116
		2	2	-0.9567	1.23933	0.03409
			3	0.87038	2.43442	0.22341
	14400	1	2	0.64429	0.62498	-0.2207
			3	-0.4748	1.2057	0.0266
		2	2	-0.4684	1.0833	-0.0315
			3	0.84842	0.5056	-0.3679
	20000	1	2	-0.45377	1.14387	-0.01978
			3	0.62902	0.56566	-0.20852
		2	2	-0.4987	1.37428	0.00707
			3	0.7089	0.37882	-0.4116
Disco de diamante	12	1	2	0.9665	0.0517	0.53306
			3	0.68486	0.30168	-0.0897

**Tabla 25.- Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de fibra de carbono**

Maquinado	Vc (Velocidad de corte)	Sentido L1 - L2	Punto de medición P	Ajuste modelo R <sup>2</sup>	a cte	b potencia
Fresado	9500 rpm	1	2	0.7795	0.39794	0.16574
			3	-0.4416	0.36091	0.02811
		2	2	0.28136	0.36139	0.07034
			3	0.95292	0.54637	0.1924
	14400 rpm	1	2	0.82741	0.74175	0.49895
			3	-0.47747	0.3029	0.02296
		2	2	0.62204	1.04801	0.26571
			3	-0.9621	0.35316	0.01553
	20000 rpm	1	2	-0.4046	0.71252	-0.07677
			3	0.1852	0.3196	-0.3
		2	2	0.22585	0.66467	-0.21707
			3	0.00034	0.52146	-0.19113
Disco de diamante	12 rpm	1	2	0.53943	0.09589	0.17731
			3	0.99891	0.03748	0.71643

**Tabla 26.- Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de maquinado en disco de diamante.**

Material	Vc (Velocidad de corte)	Sentido L1 - L2	Punto de medición 1-2-3	Ajuste modelo R <sup>2</sup>	a cte	b potencia
Fibra de vidrio	12 rpm	1	1-2-3	0.16491	0.1314	0.18567
Fibra de Carbono	12 rpm	1	1-2-3	0.966	0.08	0.29

## Lista de Figuras

- 1 Boeing 787 fabricado con 50% de materiales compuestos.
- 2 Deformación de los constituyentes por separado de un material compuesto.
- 3 Honda Prelude 2012, monoblock diseñado con un MMM de aluminio reforzado con partículas de grafito y óxido de aluminio en la zona del cilindro.
- 4 Discos de freno en automóviles diseñado en material compuesto con matriz cerámica de carburo de silicio reforzada con fibras de carbono.
- 5 Automóvil deportivo bmw m3 2013, utilizando fibra de carbono en los techos.
- 6 Clasificación de los materiales compuestos.
- 7 Compuesto particulado.
- 8 Compuestos reforzados por fibras.
- 9 Apilamiento simétrico en un laminado.
- 10 Manera de formar un compuesto polimérico a base de fibras.
- 11 Comparación de la matriz polimérica termoplástica.
- 12 Fabricación de la fibra de vidrio.
- 13 Presentación de la fibra de vidrio en el mercado: a) Roving: bobina de hilos continuos (conjunto de filamentos. b) Mat de hilos cortados: fieltros de hilos cortados y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. c) Mat de hilos continuos: fieltro de hilos continuos y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Permite un alargamiento. d) Tejido: formados por conjuntos de hilos entrelazados en dos direcciones.
- 14 Construcción de una lancha con material de fibra de vidrio.
- 15 Método de fabricación de la fibra de carbono.

- 16 Lamborghini creado con un exterior de fibra de carbono sin resina para mejorar el peso del vehículo.
- 17 Método de apilado manual (hand lay-up): a) Molde b) Fibras a utilizar c) Proceso de apilado manual.
- 18 Técnica "Filament winding".
- 19 Método de proyección (Spray-up) en molde cerrado (a) obteniendo como producto final una tabla para surfear (b).
- 20 Fibras pre-impregnado unidireccionales.
- 21 Preparación para el curado y la consolidación del material.
- 22 Ciclo del curado Ciclo de curado en el proceso de autoclave.
- 23 Curva esfuerzo-deformación de un material dúctil, al final de la curva se presenta la fractura del material [24].
- 24 Curva esfuerzo-deformación para un material completamente frágil [24].
- 25 Fractura frágil de un material metálico que presenta un patrón de líneas de Chevron en su superficie [25].
- 26 Modos de falla intralaminar: (1+) Tensión longitudinal. (1-) Compresión longitudinal. (2+) Fractura transversal con orientación de fibras  $\alpha_0=0^\circ$ . (2-) Fractura transversal con orientación de fibras  $\alpha_0=53^\circ$  [26].
- 27 Figura 27a, morfología de fractura de las fibras en tensión y figura 27b morfología de compresión en CFRP (carbon fiber reinforced polymers) [27].
- 28 Probeta de compuesto reforzada con fibra de carbono fracturada en modo de tensión.[28].
- 29 Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a

una magnificación de 600x [30].

- 30 Patrón de fractura “mirror”, “mist” y “hackle” en una probeta de vidrio sometida a tensión. [31].
- 31 Maquinados convencionales más usados en la industria manufacturerara : a) Fresado, b) Tordeado, c) taladrado.
- 32 Parámetros que influyen en la calidad superficial de un material compuesto.
- 33 Material de herramientas de corte comunes en el mercado manufacturero: a) Carburo (k), b) Diamante (PCD).
- 34 Maquinado a un material polimérico compuesto de fibra de vidrio.
- 35 Sujeción de una pieza de material compuesto de fibra de vidrio para la realización del maquinado..
- 36 Principio de operación de un rugosímetro o perfilométrico.
- 37 Imagen obtenida del análisis mediante MFA de un material compuesto de fibra de vidrio.
- 38 Rugosidad promedio en un perfil rugosimétrico.
- 39 Proceso de laminado simétrico para un material compuesto.
- 40 Procedimiento de acomodo para la preparación de la muestra rumbo al curado.1.- Tela de arranque. 2.- Película de liberación (release film). 3.- Purgador (bleeder). 4.- Película de ventilación (breather).
- 41 Dimensiones de las probetas de trabajo en fibra de vidrio (a) y fibra de carbono (b).
- 42 Dirección de giro de la herramienta de fresado relacionado al sentido de avance.
- 43 Cortadora automática para el proceso de maquinado en diamante policristalino.

- 44 Puntos para la medición de la rugosidad en el material.
- 45 Imagen de grafica rugosimétrica en coordenadas (x,y): Imagen original, b) Imagen graficada.
- 46 Resultados de rugosidad promedio en las probetas de material compuesto reforzado con fibra de vidrio y carbono respecto a la herramienta de corte utilizada: 1) Fresado en el sentido de corte 1. 2) Fresado en el sentido de corte 2. 3) Disco de diamante policristalino.
- 47 Resultados de rugosidad promedio en las probetas de material compuesto reforzado con fibra de vidrio y carbono respecto a la velocidad de corte utilizada: 1) 9500 rpm. 2) 14400 rpm. 3) 20000 rpm 4) 5000 rpm.
- 48 Rugosidad promedio (p1, p2, 3) presente en las piezas de fibra de vidrio maquinadas por medio del fresado. a) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 1 (positivo). b) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 2 (negativo). c) Rugosidad presente en el maquinado conforme la velocidad de corte: Línea azul: sentido 1. Línea roja: sentido 2.  Vc= 9500 rpm  Vc= 14400 rpm  Vc= 20000 rpm..
- 49 Rugosidad presente en las fibras de vidrio cortadas mediante disco de diamante policristalino con una velocidad de corte de 5000rpm. Rugosidad promedio (p1, p2, p3) presente por velocidad de avance.
- 50 Rugosidad promedio (p1, p2, 3) presente en las piezas de fibra de carbono maquinadas por medio del fresado. a) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 1 (positivo). b) Rugosidad presente en el maquinado del sentido 2 (negativo). c) Rugosidad presente en el maquinado conforme la velocidad de corte= Línea azul: Sentido 1. Línea roja: sentido 2.  Vc= 9500 rpm  Vc= 14400 rpm  Vc= 20000 rpm..

- 51 Rugosidad presente en las fibras de carbono cortadas mediante disco de diamante policristalino con una velocidad de corte de 5000 rpm. Rugosidad promedio (p1, p2, p3) presente por velocidad de avance.
- 52 Superficie del compósito reforzado con fibra de vidrio maquinada por fresado:  $V_c = 20000$  rpm.  $V_a = 0.2$  mm/rev.  $L = 1$ . Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35.
- 53 Superficie del compósito reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c = 20000$  rpm.  $V_a = 0.2$  mm/rev  $L = 1$ . Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500.
- 54 Superficie del compósito reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev,  $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500.
- 55 Superficie del compósito reforzado con fibra de vidrio maquinada en fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev,  $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500.
- 56 Superficie del compósito reforzado con fibra de carbono maquinada en fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev  $L = 1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35.
- 57 Superficie del compósito reforzado con fibra de carbono maquinada en fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev  $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35.
- 58 Superficie del compósito reforzado con fibra de carbono maquinado en fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev,  $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500.
- 59 Superficie del compósito reforzado con fibra de vidrio maquinada en disco de

- diamante policristalino:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/rev,  $L = 1$ , Magnificación =  
Electrones retrodispersados 20kV x35.
- 60 Superficie del compuesto reforzado con fibra de vidrio maquinada en disco de  
diamante policristalino:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/rev  $L = 1$  Magnificación =  
Electrones retrodispersados 20kV x500.
- 61 Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de  
diamante policristalino:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/rev,  $L = 1$ , Magnificación =  
Electrones retrodispersados 20kV x35.
- 62 Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de  
diamante policristalino:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/rev,  $L = 1$ , Magnificación =  
Electrones secundarios 20kV x35.
- 63 Superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono maquinada en disco de  
diamante policristalino:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/min,  $L = 1$ , Magnificación =  
Electrones retrodispersados, 20kV x500.
- 64 Muestras de superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a)  
Maquinadas mediante herramienta de fresado:  $V_c = 20000$  rpm  $V_a = 0.2$  mm/rev,  
 $L = 2$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x35. b) Fracturada a  
flexión en 3 puntos: Magnificación= Electrones secundarios 20kV x30 [30].
- 65 Muestras de superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a)  
Maquinada mediante el fresado:  $V_c = 20000$  rpm,  $V_a = 0.2$  mm/rev,  $L = 2$ ,  
Magnificación = Electrones Retrodispersados 20kV x500. b) Fractura a flexión  
en 3 puntos zona compresión: Magnificación = Electrones secundarios 20kV x900  
[30]. c) Fractura a flexión en 3 puntos zona tensión: Magnificación =Electrones  
secundarios 20kV x300 [30].
- 66 Muestras superficie del compuesto reforzado con fibra de carbono: a) Maquinada

mediante disco de diamante:  $V_c = 5000$  rpm,  $V_a = 12$  mm/min,  $L = 1$ , Magnificación = Electrones retrodispersados 20kV x500. b) Fractura a flexión en 3 puntos zona compresión: Magnificación = Electrones secundarios 20kV x900 [30]. c) Fractura a flexión en 3 puntos zona tensión: Magnificación = Electrones secundarios 20kV x300 [30].

- 67 Grafica representativa de la ley de potencia donde n corresponde a la elevación de potencia del valor  $V_a$ .

## Lista de tablas

- 1 Propiedades de resina poliéster [1]
- 2 Propiedades de resina epóxica [1]
- 3 Propiedades fibra de vidrio - carbono - convencionales [3]
- 4 Composiciones de los diferentes vidrios usados en la fabricación de fibras [9]
- 5 Grados de la fibra de Carbono
- 6 Propiedades típicas de materiales fibrosos usados como refuerzo en los compuestos [23]
- 7 Clasificación y costo de las superficie rugosas [48]
- 8 Propiedades de la resina epóxica Hexcel ES/EH84 [61]
- 9 Propiedades de la resina epóxica Hexcel M21 - T700 [62]
- 10 Condiciones de operación de la fresadora
- 11 Condiciones de operación de la herramienta de corte para fresado Dixi 7112
- 12 Condiciones de corte para la herramienta disco de diamante policristalino
- 13 Parámetros para el maquinar el compuesto a base de fibra de vidrio - carbono
- 14 Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de fresado en materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio
- 15 Comparación de la rugosidad promedio por punto de medición.
- 16 Parámetros de corte adecuados para una calidad superficial optima en el fresado de fibra de vidrio
- 17 Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de corte con disco de diamante policristalino en el material compuesto reforzado de fibras de vidrio.

- 18 Resultados de rugosidad promedio durante el proceso de fresado en materiales compuestos reforzados con fibra de carbono
- 19 Comparación de la rugosidad promedio por punto de medición
- 20 Parámetros de corte adecuados para una calidad superficial optima en el fresado de fibra de carbono
- 21 Resultados de rugosidad promedio durante el corte con disco de diamante en piezas de fibra de carbono.
- 22 Resumen de los aspectos y parámetros más importantes de la literatura estudiada
- 23 Parámetros y herramientas de corte para análisis estadístico
- 24 Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de fibra de vidrio
- 25 Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de fibra de carbono
- 26 Resultados del modelo matemático ley de potencias aplicado en muestras de maquinado en disco de diamante.