

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“PATRONES Y MECANISMOS DE FRACTURA EN LOS MATERIALES
COMPUESTOS 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:

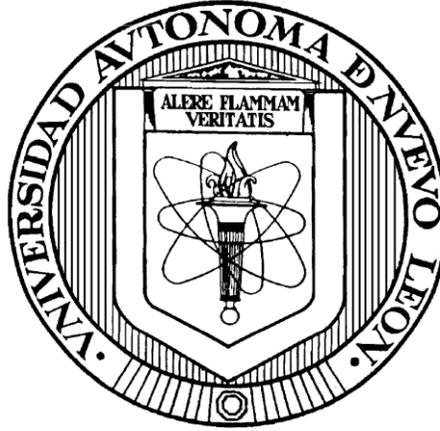
CARLOS ALFONSO RODRÍGUEZ VÁZQUEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“PATRONES Y MECANISMOS DE FRACTURA EN LOS MATERIALES
COMPUESTOS 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:

CARLOS ALFONSO RODRÍGUEZ VÁZQUEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“PATRONES Y MECANISMOS DE FRACTURA EN LOS MATERIALES
COMPUESTOS 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:

CARLOS ALFONSO RODRÍGUEZ VÁZQUEZ

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JULIO 2013

**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 "Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras" realizada por el alumno Carlos Alfonso Rodríguez Vázquez con número de matrícula 1335333 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



Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda
Revisor



Dr. Orlando Susarrey Huerta
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Julio del 2013

Dedicatoria

A Dios

A mis padres

Agradecimientos

A Dios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que nos brindan a los estudiantes en este período del proyecto de investigación.

Al Dr. Moisés Hinojosa Rivera y Dr. Jorge Aldaco por la confianza, paciencia, disposición de facilitar las cosas y de sus tiempos atendiendo todas nuestras dudas para que el proyecto se lograra.

A mis compañeros del grupo de compuestos por ayudarme y apoyarme en ellos cuando se tenía alguna duda del tema.

A mis compañeros de la generación, por compartir este tiempo con ellos, por la convivencia que se tenía en clases y en el laboratorio.

A mis padres Patricia y Alfonso, por apoyarme en las metas que me propongo a realizar, porque siempre están ahí para animarme y motivarme para seguir superando los objetivos que me propongo, a mi hermana Anna Gabriela, a mi novia Anahí por su tiempo, paciencia, apoyo y comprensión para lograr que se cumpliera este trabajo.

Muchas gracias.

Índice

Resumen	10
Introducción	12
Capítulo 1. Fractura	17
1.1 Introducción a la fractura	17
1.2 Historia de la mecánica de la fractura	17
1.3 Fractura dúctil y frágil	27
1.4 Proceso de la fractura	31
1.5 Fractografía	35
1.6 Patrones y mecanismos de fractura en los materiales	39
1.6.1 Patrones y mecanismos de fractura en metales	39
1.6.2 Patrones y mecanismos de fractura en cerámicos	47
1.6.3 Patrones y mecanismos de fractura en polímeros	49
Capítulo 2. Materiales compuestos	52
2.1 Introducción a los materiales compuestos	52
2.2 Clasificación de los materiales compuestos	53
2.3 Historia de los materiales compuestos	55
2.4 Fabricación de los materiales compuestos	56
2.5 Aplicaciones de los materiales compuestos	61
2.6 Propiedades de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio y carbono	65
2.6.1 Propiedades de la resina poliéster	65
2.6.2 Propiedades de la resina epóxica	67
2.6.3 Propiedades de las fibras de vidrio	68
2.6.4 Propiedades de las fibras de carbono	69

2.7	Niveles de estudio de los materiales compuestos	70
2.8	Patrones y mecanismos de fractura de los materiales compuestos	72
2.9	Modelos de análisis de mecánica de la fractura en materiales compuestos	77
Capítulo 3. Motivación, hipótesis y objetivos		79
3.1	Motivación	79
3.2	Hipótesis	79
3.3	Objetivo general	79
3.4	Objetivos específicos	80
Capítulo 4. Experimentación		81
4.1	Materiales	81
4.1.1	Resina poliéster	81
4.1.2	Resina epóxica	82
4.1.3	Fibras de vidrio	83
4.1.4	Fibras de carbono	83
4.2	Preparación de las probetas	84
4.2.1	Preparación de probetas de resina poliéster sin refuerzos para la generación de fracturas en tensión	85
4.2.2	Preparación de probetas de resina poliéster sin refuerzos para la generación de fracturas en flexión	87
4.2.3	Preparación de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio para la generación de fracturas en flexión	89
4.2.4	Preparación de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio para la generación de fracturas en flexión	91
4.2.5	Preparación de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono para la generación de fracturas en flexión	92

4.3	Generación de fracturas	93
4.3.1	Generación de fracturas en tensión a probetas de resina poliéster sin refuerzo	93
4.3.2	Generación de fracturas en flexión a probetas de resina poliéster sin refuerzo	93
4.3.3	Generación de fracturas en flexión a probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio.	94
4.3.4	Generación de fracturas en flexión a probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio y a probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de carbono	95
Capítulo 5. Resultados y discusión		96
5.1	Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en tensión	97
5.2	Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en flexión	98
5.3	Resultados y discusión de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión	99
5.4	Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión	102
5.5	Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturadas en flexión	107
Capítulo 6. Conclusiones		109
Referencias		112

Resumen

El objetivo de esta investigación es el de aportar un estudio documental y experimental acerca de los patrones y mecanismos de fractura característicos de los materiales compuestos. Los materiales a utilizar para esta investigación fueron resinas poliéster y epóxica como matrices de los compuestos y fibras de vidrio y carbono como los refuerzos. Se fabricaron probetas con base en las normas ASTM D790 Y D3039 para fracturarlas en tensión y flexión, las probetas fabricadas se realizaron con un 30% en peso de fibras en la matriz y fueron fracturadas a temperatura ambiente, posteriormente se realizó el estudio fractográfico mediante Microscopía Electrónica de Barrido. Para conocer a fondo los patrones y mecanismos de fractura también se realizaron fracturas en tensión y flexión a la resina poliéster en su estado puro, es decir, sin sus refuerzos. Para la resina poliéster se utilizó un 3-4% en peso de catalizador para su endurecimiento, posteriormente se fabricaron las probetas para fracturarlas en tensión, los patrones de fractura presentados fueron: patrones de río, fracturas radiales y clivaje en etapas. Posteriormente cuando se introdujo el refuerzo (fibra de vidrio) se fracturaron las probetas en flexión, los patrones de fractura identificados en las probetas mediante fractografía fueron: la delaminación causado por el mecanismo de fractura "debonding", una interfase deficiente entre la fibra y la matriz, patrones de fracturas radiales en las fibras causado por un mecanismo de esfuerzos de tensión, así como también microbuckling, un patrón característico causado por un mecanismo de esfuerzos de compresión.

De igual manera las resinas epóxicas reforzadas con fibra de vidrio o carbono presentaron los mismos patrones y mecanismos de fractura. Por último, se pudo concluir que estos patrones y mecanismos se presentan en todas las probetas fracturadas; sin embargo, surge la pregunta ¿Cuándo es más probable que se presente cierto patrón de fractura?, es decir, ¿Cuándo será delaminación causado por debonding? y ¿Cuándo será fractura de la fibra?, la delaminación ocurrirá

siempre y cuando la interfase entre la fibra y la matriz sea débil, en cambio si la interfase presenta buena adhesión se presentaran mecanismos de fractura en las fibras.

Introducción

Un compuesto es una combinación de dos o más materiales diferentes, con una interfase distinguida entre ellos (1). Generalmente un material compuesto está formado por la matriz y el refuerzo. Las principales aplicaciones de los materiales compuestos incluyen mercados como la industria aeroespacial, automotriz, marítima, artículos deportivos y pipas de combustible.

Los materiales compuestos se han utilizado para la fabricación de muchas partes estructurales en aplicaciones de ingeniería. Esto se debe a sus características atractivas, tales como peso ligero, alta resistencia, alta rigidez, buena resistencia a la fatiga y buena resistencia a la corrosión (2). El concepto de materiales compuestos no es una invención humana, considérese por ejemplo el caso de la madera que es un material compuesto natural que consiste de fibras de celulosa con una buena resistencia y rigidez y una matriz de resina de un polímero polisacárido (3).

En décadas pasadas los materiales compuestos se utilizaban casi exclusivamente en aplicaciones militares, su alto costo de fabricación era una de las principales limitantes para ampliar su uso en otros mercados. Sin embargo, a través de los años se han ido desarrollando procesos más eficientes y óptimos para la obtención de los compuestos, lo que ha permitido ampliar su uso en la rama de los deportes, la industria aeroespacial y automovilística, vislumbrándose un futuro muy prometedor para estos materiales, un claro ejemplo de su amplio uso lo representa la figura 1. El Boeing 787 en donde el 50% del avión está fabricado con materiales compuestos, aluminio 20%, titanio 15%, acero 10%, otros materiales 5%. Se cree que la presente tesis aportará conocimientos para una mejor comprensión de estos materiales, pues se vislumbra un futuro prometedor de estos en muchas industrias, una de ellas la aeroespacial.

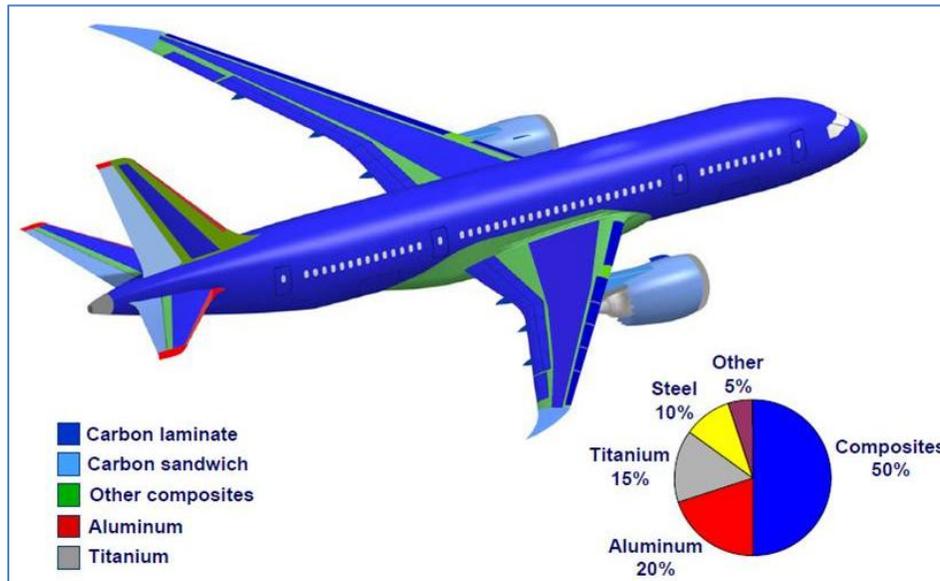


Figura 1. Boeing 787 fabricado con 50% de materiales compuestos.

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 3 mil 266 millones de dólares, con una balanza comercial superavitaria de más de 401 millones de dólares en el 2010. 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).

La cadena de valor mexicana se encuentra localizada en 17 entidades federativas (figura 2), de las cuales destacan las siguientes regiones:

1. Región Noroeste (Baja California, Sonora y Chihuahua). Concentra más de la mitad de la industria nacional, especializada en sistemas eléctrico - electrónicos; sustentándose un primer nicho de especialidad regional en aviónica.
2. Región Centro - Norte (Ciudad de México, Querétaro y Nuevo León). Se especializa en ensambles de componentes de alto valor agregado. Querétaro destaca por la fabricación de ensambles y la Ciudad de México y Nuevo León destacan por la ubicación de los principales aeropuertos del país, especializándose en actividades de reparación y mantenimiento de aeronaves (4).

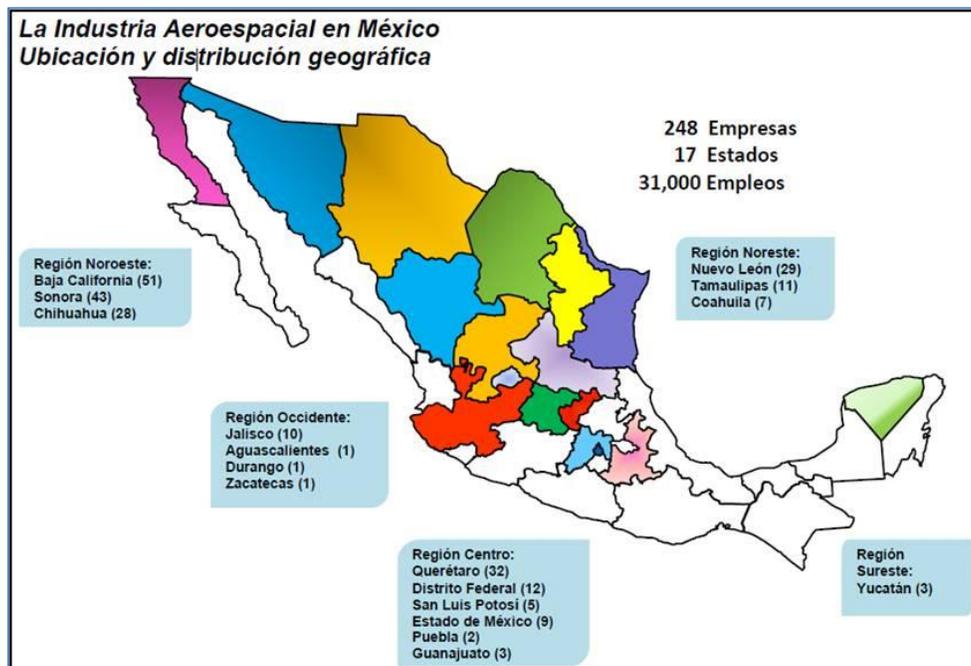


Figura 2 Industria Aeroespacial en México, ubicación y distribución geográfica (4).

La tabla 1 muestra los principales clusters en el país, describiendo la compañía y el proceso específico en el cual se tiene un enfoque con la manufactura aeroespacial.

Tabla 1. Principales clusters en México (4)		
Principales Clusters	Principales jugadores	Especialidad
Baja California: <ul style="list-style-type: none"> • Mexicali • Tecate • Tijuana 	51 empresas entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Honeywell • Gulfstream • Interiores Aéreos. 	Eléctrico-Electrónico Manufactura de partes
Chihuahua: <ul style="list-style-type: none"> • Chihuahua • Cd. Juárez 	28 empresas entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Labinal, de grupo Safran • Cessna Aircraft • Textron International • Grupo America Industries 	Manufactura de partes y fuselaje, eléctrico-electrónico, interiores mecanizados.
Querétaro: <ul style="list-style-type: none"> • Querétaro 	32 empresas entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Bombardier • ITP Ingeniería y Fabricación • SNECMA, de grupo Safran • Messier Dowty de grupo Safran • GE-IQ • Aemnova y Eurocopter 	Fabricación de componentes de motor y trenes de aterrizaje. Ensamble de componentes y fuselajes de avión. MRO.
Sonora: <ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • Guaymas • Cd. Obregón 	43 empresas entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Goodrich Aerostructures de México. • ESCO 	Manufactura de componentes para motores y turbinas, fuselaje y materiales compuestos.
Nuevo León: <ul style="list-style-type: none"> • Apodaca • Monterrey • Santa Catarina 	29 empresas entre las que destacan: <ul style="list-style-type: none"> • Frisa Forjados • MD Helicopters 	Forjas y maquinados, fabricación de componentes, ensambles de fuselajes de helicópteros.

El creciente uso de los materiales compuestos obliga a los ingenieros de diseño y manufactura a comprender el comportamiento de estos materiales en aplicaciones industriales. De acuerdo al estado del arte existen investigaciones, modelos y simulaciones que describen su desempeño funcional, pero se ha concluido que

existen áreas de oportunidad en la fidelidad que arrojan los resultados. La fractura ha sido estudiada por muchos científicos a lo largo del tiempo para poder predecir fallas, patrones y mecanismos de fractura en estructuras funcionales y poder evitar consecuencias catastróficas, parte del motivo de investigar este fenómeno físico en los materiales compuestos es que aún no se llega a un nivel de comprensión tan amplio en comparación con otros materiales, por ejemplo, los metales, los cerámicos y los polímeros. Se percibe en la industria y en la academia nacional, un déficit de especialistas en los aspectos científicos y tecnológicos de estos materiales.

El presente trabajo que versa sobre la fractura de materiales compuestos se ha dividido en seis capítulos. En el capítulo uno se describe el concepto de fractura, resumiendo las investigaciones realizadas a través de los años; se explican las características principales para identificar fracturas dúctiles o frágiles, así mismo, se discute la fractografía como herramienta de análisis para la identificación de los patrones y mecanismos de fractura en los materiales, se presentan los principales patrones de fractura en los materiales metálicos, cerámicos y poliméricos. En el capítulo dos se presentan los materiales compuestos, su clasificación, sus diferentes métodos de fabricación, principales aplicaciones industriales y patrones y mecanismos de fractura conocidos hasta el momento. En el capítulo tres se propone la justificación de esta investigación, hipótesis y objetivos. En el capítulo cuatro se explican los tipos de materiales utilizados, su elaboración, las normas utilizadas y la experimentación de la investigación. 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.

Capítulo 1. Fractura

1.1 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 (5).

Hay grietas en todas las estructuras como resultado de defectos de fabricación o los diferentes tipos de carga. En caso de que la carga sea cíclica, algunas grietas pueden aparecer o propagarse como resultado de la fatiga del material. En las etapas finales de la propagación de grietas, la velocidad de la grieta crece muy rápido y se puede originar la falla en la estructura. El estudio de la mecánica de la fractura podría evitar esas fallas. La evolución de la mecánica de la fractura puede estudiarse a partir de al menos tres puntos de vista: analíticos, numéricos y experimentales (6).

1.2 Historia de la mecánica de la fractura

Leonardo da Vinci fue el primero quien trató de estudiar la relación inversa de proporcionalidad entre la longitud de un cable y su resistencia, así como también fue el primero que estudió el efecto de tamaño, la relación entre el tamaño de la estructura y su resistencia interior.

Galileo Galilei fue el primero en investigar desde un punto de vista matemático el problema de las grietas, él formuló que la carga de fractura de una barra en tensión es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud (7)

La Revolución Industrial del Siglo XIX trajo consigo un incremento en la demanda de metales, particularmente del hierro y acero para ser usados en ingeniería y la construcción a grandes escalas. Esta grande y feroz expansión del mundo de la ingeniería fue acompañada por una frecuencia mayor de fallas en estructuras de ingeniería. De hecho, la fractura de vías de ferrocarril fue algo común, tanto que alrededor del año 1870 la revista de Ingeniería Británica reportó estadísticas semanales acerca de accidentes ferroviarios. Posteriormente, en 1900 con la aparición del automóvil, seguido por los aeroplanos, se incrementó la provisión de factores de seguridad adecuados y la necesidad de entender de manera más clara el fenómeno de ruptura. Sin embargo, la respuesta fue dirigida principalmente a la mejora de materiales, perfeccionando los procesos de fabricación y de inspección. Con estas herramientas, la práctica del control de fractura se basó principalmente en la experiencia de fallas, factores de seguridad y de ensayos, durante el período de 1900-1950 (7).

Los orígenes de la mecánica de fractura pueden remontarse a un artículo publicado por A.A. Griffith (8) (1920), en el cual demostró por primera vez que la resistencia real a la tensión de materiales frágiles era significativamente menor que la resistencia predicha teóricamente debido a la presencia de grietas (7)

La contribución a menudo derivada del artículo de Griffith ha sido la ecuación que relaciona el esfuerzo de fractura con el tamaño de la grieta:

$$\sigma^2 = \frac{2\gamma E}{\pi a}$$

Donde a es la longitud de la grieta, γ la tensión superficial y E el módulo de Young. La idea principal de la obra de Griffith fue que la propagación de grietas se determina por la relación entre la energía de deformación y la energía superficial necesaria para la creación de las nuevas superficies al avanzar la grieta. Griffith afirmó que cuando una grieta se propaga, la disminución de la energía de

deformación es compensada por el aumento de la energía potencial causada por la tensión en las superficies de grieta recién creadas (6).

Inglis proporcionó una expresión simple para el esfuerzo máximo en la punta de la muesca (modelada como la mitad de la elipse), la cual aún permanece en uso. El demostró que la ecuación del esfuerzo máximo presentaba la forma:

$$\sigma_{max} = \sigma \left[1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right]$$

Donde σ es el esfuerzo aplicado, a es la mitad de la longitud de la muesca y ρ es el radio de la raíz de la muesca (7).

Inglis demostró que, a medida que la elipse se aproximaba a una grieta lineal, los esfuerzos en la punta de la elipse, tendían al infinito. Observando este hecho, Griffith (1920 -1924) concluyó que, en la presencia de una grieta, el valor del esfuerzo no puede usarse como un criterio de falla, puesto que el esfuerzo en la punta de una grieta aguda, en un medio continuo y elástico, es infinito sin importar que tan pequeña sea la carga aplicada. Esto lo llevó a proponer un criterio de energía de falla. La enorme contribución hecha por Griffith fue quitar la atención de la región altamente-esforzada, a la punta de la grieta e instituir una condición necesaria y simple para la fractura en términos de un balance de energía. A pesar de que la aproximación de Griffith estuvo apoyada por los estudios de clivaje en mica desarrollados por Obreimoff en 1930, el trabajo de Griffith permaneció prácticamente inadvertido por algunas décadas. La tabla 2 muestra algunas investigaciones elaboradas durante el período de 1920 a 1940.

Tabla 2. Investigaciones en el período de 1920-1940 (7).		
Autor	Año	Aportación
A.F. Joffe	1924	Pionero en estudios de fractura frágil relacionados con la física de fractura de cristales.
N.N. Davidenkov	1928	Realizó estudios en probetas con muesca en flexión, con la influencia de bajas temperaturas y el efecto de la velocidad inducida por impacto en metales; esto con la finalidad de mejorar el entendimiento y evaluar la susceptibilidad de los metales a la fractura frágil.
A.P. Alexandrov y S.N. Zhurkov	1933	Realizaron trabajos pioneros en el estudio de los efectos de escala en fracturas, así como los efectos del medio ambiente en conexión con la resistencia y fractura de fibras de vidrio.

Sin embargo, en los cuarenta, las ideas de Griffith se convirtieron en la piedra angular para el desarrollo de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM), estimulada por algunas fallas sin solución de estructuras metálicas, por ejemplo, la separación por fractura de los cascos en los barcos “Liberty” de la Armada de los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial.

En el período comprendido de 1937 - 1954, Irwin estuvo al frente del “Naval Research Laboratory Ballistic Branch”. En 1945 supuso que la teoría de Griffith podía ser modificada para predecir el inicio de la fractura debido al agrietamiento inicial en materiales de ingeniería. Los resultados de un estudio del espesor de la deformación plástica obtenidos usando dispersión de rayos X a partir del plano de clivaje en un acero estructural de baja resistencia (acero de bajo carbón), reportados por Orowan (1945) fueron de especial interés para este propósito. El resultado fue una indicación de que, incluso para la fractura frágil por clivaje, la pérdida de

energía del campo de esfuerzos para ganar energía de superficie era trivial en comparación a la rapidez de pérdida debida a la deformación plástica.

El segundo logro más importante en los fundamentos de Mecánica de la Fractura fue en 1957 debido a la introducción de los factores de intensidad de esfuerzos K cerca de la punta de la grieta:

$$\sigma \propto \frac{K}{\sqrt{r}}$$

Donde r es la distancia desde la punta de la grieta.

Irwin propuso la idea de una grieta de segmento recto, que tiene singularidades en los dos extremos y propone una generalización de la teoría de Griffith a una grieta arbitraria. Al mismo tiempo, introdujo un nuevo principio de la propagación de grietas que dice que una grieta se propagará si la tasa de la energía de deformación G es más grande que el trabajo crítico necesario para crear nuevas superficies de grietas. También hizo hincapié en que cualquier fractura puede ser descrita en términos de los tres casos fundamentales de fractura: Modo I “opening mode” Modo II “sliding mode” y Modo III “the tearing case” figura 3.

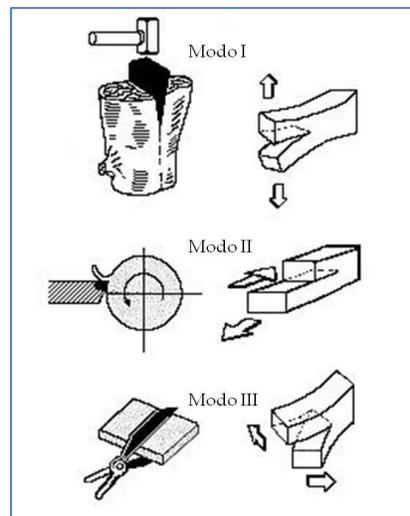


Figura 3. Modos fundamentales de fractura (7).

Irwin también propuso un primer método experimental para el estudio de grietas, llamado tensómetro de resistividad eléctrica. En 1958 aparecieron los primeros trabajos sobre el análisis experimental de los factores de intensidad de esfuerzos sobre la base de fotoelasticidad por Wells y Post. A partir de las ideas de Wells y Post, Irwin en el mismo año realizó un análisis de los factores de intensidad de esfuerzos sobre la base de los datos de una línea isocromática (6).

En 1959 Barenblatt propuso el método de interfaces cohesivas, también fue el primero que consideró en la teoría de elasticidad lineal las fuerzas de cohesión en las proximidades de la punta de la grieta. Su teoría se basa en una original relación tracciones-desplazamientos, que considera interfaces de desplazamientos. En su modelo general “equilibrio de grietas formadas durante fractura frágil”, la distribución de estas fuerzas de cohesión no se especificó. Dugdale en 1960 supone que estas fuerzas son conocidas y constantes. Estas ideas fueron posteriormente implementadas en los algoritmos de elementos finitos estándar y en los códigos comerciales que incorporan las interfaces en las estructuras de los elementos finitos (6).

En 1961 fue la primera vez que se planteó el problema de la propagación de grietas debido a la fatiga del material. París en ese año declaró dentro del marco de la elasticidad lineal la ley de la propagación de una grieta:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

Donde a representa la longitud con la que la grieta se mueve hacia delante durante un ciclo de carga, N números de ciclos hasta ruptura, n constante experimental y ΔK es la variación de los factores de intensidad de esfuerzos, durante la misma carga de ciclo, C es un parámetro que depende de la carga y geometría del modelo.

Una generalización de la ley de Paris, para el estudio de la propagación por fatiga es:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$$

Donde $f(\Delta K)$ es una función que depende de la variación de los factores de intensidad de esfuerzos. Integrando la ecuación anterior, se puede obtener el número de ciclos necesarios para que una grieta se propague desde una longitud inicial (l_0) a una longitud crítica (l_{cr}), en la que falla la estructura:

$$N_{cr} = \int_{l_0}^{l_{cr}} \frac{1}{f(\Delta K)} da$$

En los años siguientes, numerosos investigadores han desarrollado diferentes formas particulares de la función $f(\Delta K)$ (6).

Uno de los métodos más famosos e importantes en la validación del elemento finito es la prueba de parche (*the path test*), propuesta en 1966 por Irons. Este método ha sido mejorado con el tiempo por muchos investigadores y continúa siendo una herramienta poderosa en el análisis del método de elementos finitos en la actualidad.

En 1968, Rice se dio cuenta de que la evaluación precisa de los factores de intensidad de esfuerzos era muy importante, ya que caracterizan totalmente el comportamiento de la grieta. La determinación de estos factores es el objetivo principal de la mecánica de la fractura por cómputo, ya que estos son esenciales en el estudio de la estabilidad y la propagación de grietas (6).

Rice introdujo un nuevo parámetro en el estudio de grietas, la integral J . Esto debido que cuando una grieta se presenta en un material, ésta se presenta implícitamente en la región plástica enseguida de la punta de la grieta, dependiendo del tamaño de esta región plástica la tasa de energía de deformación

propuesta por Griffith, no puede aplicarse directamente. A fin de tener en cuenta estas regiones de plasticidad, en el marco de mecánica elástica lineal de la fractura, hay una equivalencia entre la integral J y la tasa de la energía de deformación G (6).

La característica más importante de la integral J se basa en el hecho de que la caracterización del desplazamiento y las discontinuidades de tensión se realizan haciendo uso de algunas integrales por caminos que no pasan a través de las discontinuidades del material.

En los 1970's In Chan usó elementos finitos lineales y propuso un refinamiento de la malla para caracterizar mejor la singularidad. Al mismo tiempo Byskov propuso un nuevo tipo de elemento finito triangular, que contenía una grieta; este elemento estaba destinado a describir la grieta mejor que todos los demás elementos finitos triangulares considerados antes. Su enfoque fue sobre la base de una solución analítica en un "elemento principal" para el campo de la grieta, haciendo uso de funciones complejas de Muskhelishvili. Este trabajo presentaba un método para el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzos (6).

La tabla 3 muestra las investigaciones realizadas en las últimas décadas acerca de la mecánica de la fractura.

Tabla 3. Historia de la mecánica de la fractura (1970 - 1999) (6).		
Año	Autor	Contribución
1972	Duncan Fama	Aparecen las primeras investigaciones de grietas circunferenciales en conchas cilíndricas.
	Rice	Propuso un eficiente método numérico para el estudio de grietas en placas: " <i>line spring method</i> "
1973	Strang y Fix	Publican un libro que presenta un marco teórico matemático del método del elemento finito, mencionando la evolución de este método y el mayor impacto en el cómputo mecánico.
1973	Leicester	Continúa con las ideas de Galileo Galilei de 1638, acerca de la influencia del tamaño del cuerpo y su estado de tensión.
1974	Veubeke	Proporciona nuevas ideas para la prueba del parche (<i>the path test</i>), usó fórmulas de variación para obtener ecuaciones de elasticidad lineal bidimensional.
1976	Paris	Desarrolló métodos que brindaron una claridad y simplificación de los análisis hasta la implementación del elemento finito.
1976	Hillerborg	Propuso la idea de longitud característica de una grieta para materiales frágiles.
1980	Tan y Fenner	Pusieron en práctica el método de elementos de frontera en la fractura para calcular los factores de intensidad de tensiones para los depósitos cilíndricos. Rara vez se utiliza en el estudio de grietas, debido al gran número de cálculos y las dificultades en la aplicación en las fronteras.
1983	Owens y Fawkes	Publicaron un libro en el que presentaron los métodos para el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzos mediante el método de los elementos finitos. Describen los métodos principales: el método integral J, el método de extensión

		virtual, y el método de extrapolación de desplazamiento.
1985	Hull	Utiliza una técnica de extrapolación del desplazamiento en el estudio de grietas circunferenciales en carcasas cilíndricas, mencionando fórmulas para los factores de intensidad de esfuerzos.
1987	Nishikov y Atluri	Propusieron una extensión del principio de extensión virtual para un caso de tres dimensiones. Desarrollaron expresiones originales para la integral J en un espacio de tres dimensiones.
1992	Barbero y Reddy	Desarrollaron una variante del método de extensión virtual llamado el método de derivado Jacobiana. Este método se basa en un modelo, que describe la energía potencial en términos de desplazamiento y las coordenadas nodales, utilizando elementos isoparamétricos. El objetivo de su trabajo fue el estudio de las grietas que aparecen en los materiales compuestos laminados.
1997	Zhang y Chen	Estudiaron elementos finitos híbridos a partir de un principio de variación del tipo Hu-Washitzu. Este artículo puede ser una guía para la construcción de nuevos elementos finitos.
1997	Zienkiewicz y Taylor	Hicieron un análisis de la prueba de parche con ejemplos simples para placas.
1999	Belytschko	Utilizó un método de partición de la unidad, aportando una mejor comprensión a nivel local de la aproximación de elementos finitos, introdujo funciones discontinuas en la aproximación para caracterizar discontinuidades arbitrarias. Este método no es adecuado para grandes grietas, y no se recomienda esta realización con funciones discontinuas para representar el desplazamiento lejos de la punta de la grieta

1.3 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 4 muestra la curva de esfuerzo-deformación de un material dúctil.

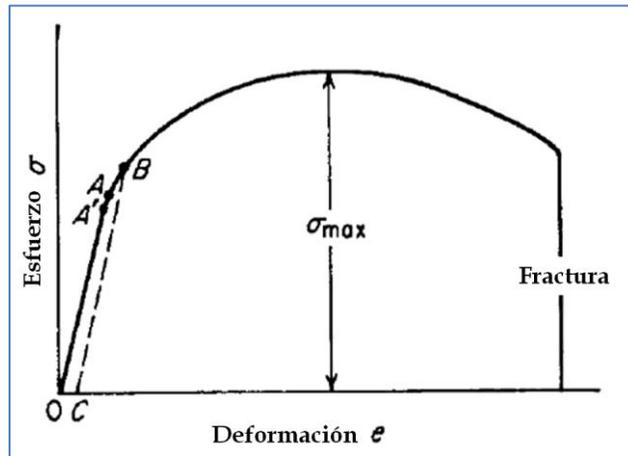


Figura 4. Curva esfuerzo-deformación de un material dúctil, al final de la curva se presenta la fractura del material (5).

Un material completamente frágil se fractura casi en el límite elástico (figura 5).

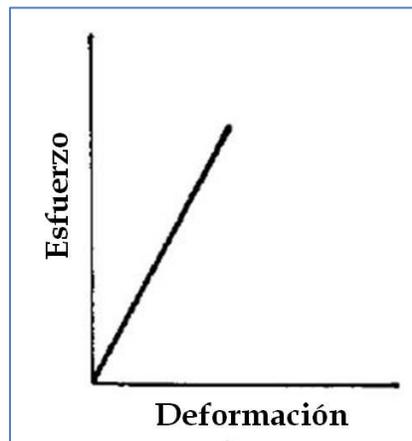


Figura 5. Curva esfuerzo-deformación para un material completamente frágil (5).

Una adecuada ductilidad es una importante consideración de la ingeniería, porque permite redistribuir el material a esfuerzos localizados. Sin embargo los esfuerzos localizados en muescas y otras concentraciones de esfuerzos accidentales no tienen que ser considerados, pues es posible diseñar para situaciones estáticas sobre la base de esfuerzos promedios. Pero, con materiales frágiles, los esfuerzos localizados continúan acumulándose cuando no hay rendimiento local y finalmente se forma una grieta en uno o más puntos de concentración de esfuerzos, y se propaga ésta rápidamente sobre la sección (5).

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. Se le llama fractura transgranular cuando la grieta se propaga a través de los granos e intergranular cuando la propagación se efectúa a través de las fronteras de grano. La figura 6 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.

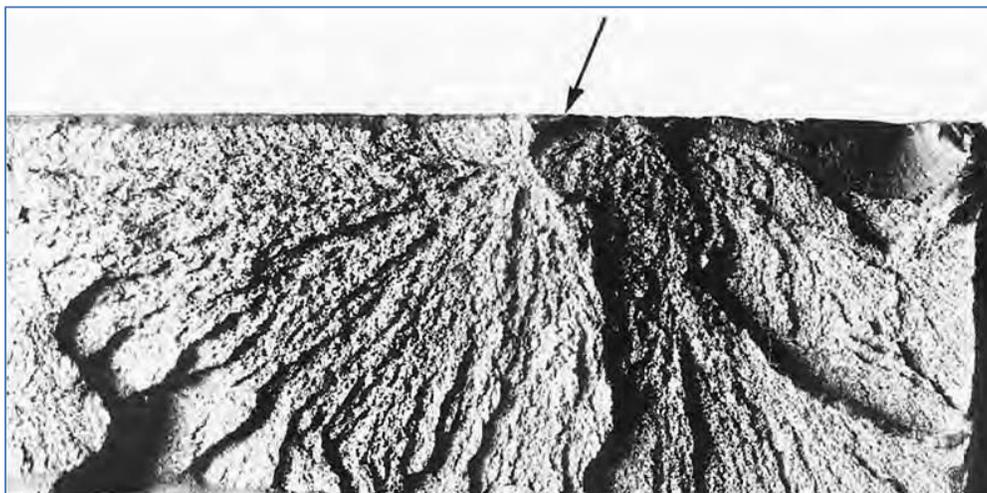


Figura 6. Fractura frágil de un material metálico que presenta un patrón de líneas de Chevron en su superficie (9).

La figura 7 muestra la fractografía de un hierro vaciado dúctil, que presenta fractura transgranular.

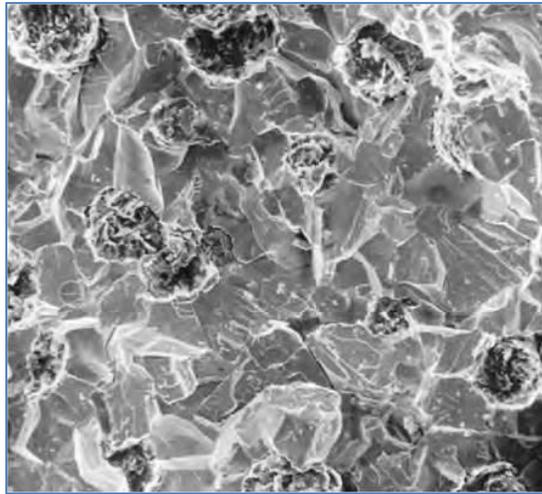


Figura 7. Fractografía de hierro vaciado dúctil que presenta fractura a través de los granos (9).

Por otro parte la figura 8 muestra la fractografía de un material dúctil que presenta fractura intergranular, es decir, cuando la grieta se propaga a través de las fronteras de grano.



Figura 8. Fractura intergranular de un acero (9).

Durante mucho tiempo se ha considerado a la mayoría de los metales, como materiales con una combinación excelente de buenas propiedades de resistencia vs plasticidad. Estas propiedades se manifiestan gracias a la fuerza de cohesión que existe entre sus átomos, llamada la resistencia teórica cohesiva, lo que les permite tener altos puntos de fusión, plasticidad, ductilidad y bajos coeficientes de expansión térmica (5).

La figura 9 muestra la variación de la fuerza de cohesión entre dos átomos contra la separación de ellos sometidos a una carga de tensión. El espacio interatómico está representado por a_0 , si se comienza a aplicar una carga de tensión la separación entre los átomos comenzará a incrementar (x). El punto máximo de la curva (σ_{max}) se presentará cuando las fuerzas de repulsión entre los átomos sea despreciable y que la fuerza de atracción vaya disminuyendo a consecuencia de la separación de los átomos (5).

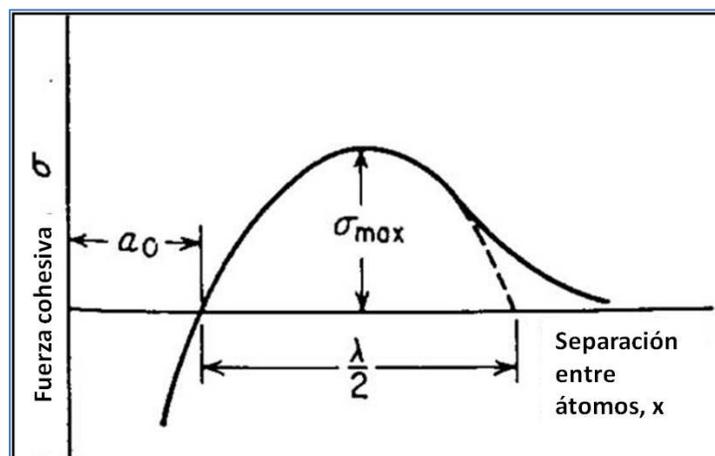


Figura 9. Fuerza de cohesión de los átomos en función de la separación entre ellos (5).

Se ha observado que la resistencia teórica cohesiva ha sido mucho mayor que la resistencia que presentan los materiales cuando se fracturan, lo que conllevado al estudio de los esfuerzos necesarios para que las microgrietas o defectos se conviertan en una fractura final.

1.4 Proceso de la fractura

Independientemente del tamaño de la estructura que falla durante la fractura, el proceso de la fractura siempre toma lugar en una pequeña región cerca de la orilla de la grieta. Esta región, llamada la región del proceso, está sometida a cargas altas de esfuerzo. Las separaciones del material ocurren en esta región que es muy crítica para la estructura: mientras otras partes del material usualmente pueden ser descritas por ecuaciones apropiadas, esto no es posible para la región del proceso (figura 10) (10). Desafortunadamente, los procesos que rigen la disipación de la fractura en las cercanías de la grieta son complejos. Dependiendo del tipo de material, existen un gran número de procesos disipativos que van desde la formación de dislocaciones en materiales cristalinos hasta el desenredo de las cadenas de moléculas en los polímeros (11).

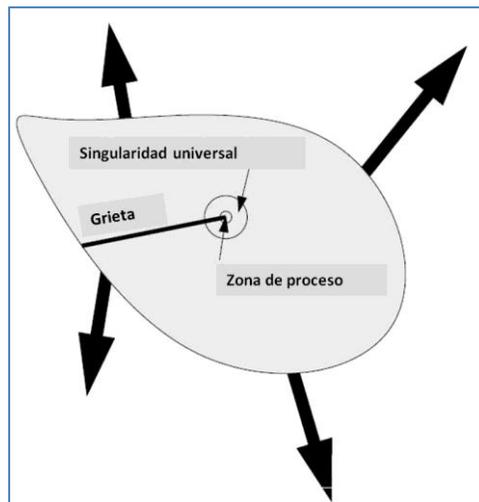


Figura 10. Estructura de mecánica de la fractura. La grieta está rodeada por una región que físicamente no es conocida.

La apariencia física de la región del proceso y los procesos físicos varían entre los diferentes materiales. Incluso hay variaciones dentro de un mismo material en diferentes condiciones ambientales, por ejemplo, en diferentes temperaturas y diferentes rangos de carga. También existen variaciones aleatorias que se producen

a lo largo del borde de la grieta, y las propiedades de la región pueden cambiar durante el proceso de crecimiento de la grieta. Sin embargo, independientemente de la gran cantidad de variaciones, algunas características son comunes a casi todas las regiones de proceso (10).

Al incrementar la carga en un material, ya sea en una aplicación industrial o en una prueba mecánica, se genera una concentración de esfuerzos que hace que se formen microseparaciones entre la interfase de la matriz y las partículas, lo que ocasiona que las microseparaciones se vayan propagando a través de las interfaces hasta que las partículas están totalmente separadas, teniendo como resultado un vacío. La nucleación y el crecimiento de la grieta son factores que juegan un papel fundamental en la región del proceso de la fractura, pero también existen las microseparaciones, que las podemos entender como separaciones del material ó faltas de cohesión a nivel micro estructural. Existen varios tipos de microseparaciones, algunas de ellas son:

Micro-grietas, son muy comunes en metales a bajas temperaturas y cerámicos policristalinos.

Huecos (*voids*), generalmente se presentan en metales a temperatura ambiente.

Cavidades en las fronteras de grano, se presentan en los metales a temperaturas elevadas.

Ruptura y desenredo (*disentanglement*) de moléculas, común en los polímeros.

Ruptura de enlaces atómicos, fenómeno presente en los cerámicos.

Deslizamiento de dislocaciones, presente en hojas de metales.

En base a esto, ¿Cómo saber cuáles son los defectos que dominan o dan origen al inicio de una grieta? y ¿En cuál de las grietas ocurre la región del proceso de la fractura? Las microseparaciones son nucleadas en heterogeneidades del material,

por ejemplo, partículas, hoyos, defectos, puntos en las fronteras de grano, intersección de dislocaciones. La distancia “ d ” (separación entre granos) entre los granos dominantes en la nucleación es significativa, porque esta distancia controla el tamaño de la región del proceso a bajas velocidades de propagación de las grietas (10).

¿Cuáles son los granos que dominan la región del proceso? Existe una regla que dice que los granos que dominan la región del proceso son aquellos en que las microseparaciones nuclean primero, pero si son pocos, los granos más pequeños y más abundantes dominarán el proceso (10).

En general, las microseparaciones son nucleadas primero en los granos más grandes, pero cuando este proceso termina, la carga disminuye en esos granos y se transfiere a los granos pequeños. De esta manera, los granos más pequeños pueden contribuir de manera significativa a la coalescencia entre los granos más grandes y la grieta principal.

En la figura 11 se puede identificar cuatro regiones que se presentan en el proceso de la fractura, cerca de la orilla de la grieta está la *región del proceso*, cuando la orilla de la grieta comienza a crecer, una especie de estela de la región del proceso comienza a quedarse atrás. Fuera de la orilla de la grieta se encuentra una *región plástica* que, de igual manera, conforme va avanzando la orilla de la grieta va dejando una estela, en este punto el material se comienza a deformar elásticamente, debido al retiro de la carga aplicada y en muchas ocasiones ocurre una deformación plástica secundaria generada por la deformación plástica primaria, a estas dos regiones, es decir, las regiones plásticas primaria y secundaria se les conoce como regiones disipativas, todo lo que esté fuera de estas regiones le llamamos zonas elásticas (10). En la figura también se observa las fases del crecimiento de la grieta, inicialmente se aplica una carga y no se presenta crecimiento de la grieta, al aumentar la carga la grieta comienza a crecer a causa de la nucleación, en este proceso se mantiene un crecimiento de grieta estable,

conforme la nucleación y propagación de la grieta va creciendo, la grieta se convierte finalmente en una grieta inestable, dando origen a una fractura final en el material.

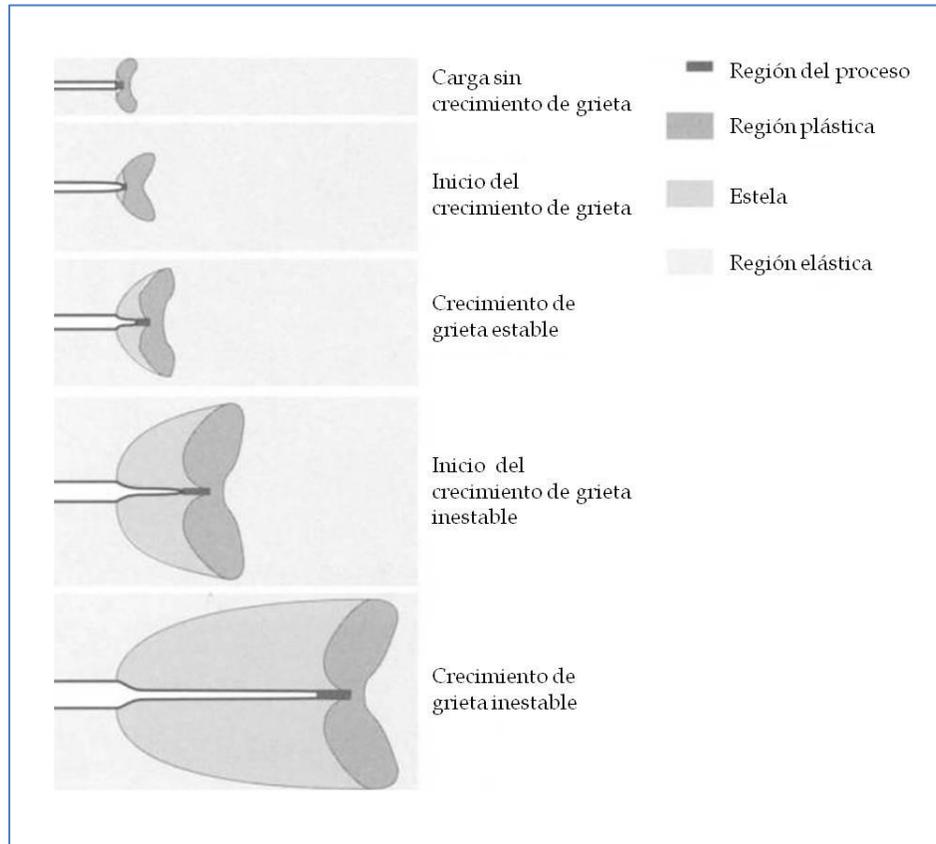


Figura 11. Las tres fases del proceso de fractura son: 1. Carga sin crecimiento de la grieta, 2. Crecimiento de grieta estable, 3. Crecimiento inestable de la grieta (10)

1.5 Fractografía

Fractografía es el término dado por Carl A. Zapffe en 1944 a su descubrimiento de un medio para superar la dificultad de llevar la lente de un microscopio suficientemente cerca de la superficie irregular de una fractura para revelar sus detalles dentro de los granos individuales. El propósito de la fractografía es analizar las características de fractura para intentar relacionar la topografía de la superficie de fractura con las causas y / o los mecanismos básicos de la fractura. Etimológicamente, la palabra fractografía es similar en su origen a la palabra metalográfico; *fracto* deriva del latín *fractus*, que significa fractura y *grafía* deriva del término griego *grafo*, es decir, tratamiento descriptivo (12).

La mayoría de los estudios microscópicos de los metales en el año 1900 se limitaron a los exámenes de las probetas pulidas. En la década de 1930, un número de investigadores reconoció que las propiedades de los aceros podrían estar correlacionadas con la rugosidad macroscópica o finura de la superficie de fractura (12).

El estudio de la topografía de la superficie de fractura y su relación con la propagación de la grieta, o, en otras palabras la fractografía, se refiere a desentrañar o decodificar esta información. Este tipo de análisis proporciona una herramienta científica de gran alcance en muchas áreas, tales como el análisis microestructural, desarrollo de materiales, análisis de fallos de diagnóstico y procesos de control. Existen tres pasos básicos para el análisis de superficies de fractura que están en todos los estudios científicos basados en experimentos: 1) observar, 2) describir y medir, 3) interpretar. Estos pasos no son independientes y no pueden ser tratados como procesos separados en una investigación, porque lo que uno ve y observa depende de lo que uno sabe y entiende. Los procesos de observación, descripción e interpretación pueden ser una red compleja. Esto es particularmente cierto para el trabajo experimental en todas las formas de la microscopía (13).

La rugosidad de las superficies de fractura, se presenta en todas las escalas de observación, siendo una dificultad describir la topografía de estas superficies cualitativamente o en términos matemáticos. Este problema es muy común en muchos fenómenos, particularmente en patrones de la naturaleza. Estos patrones se presentan de manera aleatoria, sin embargo, presentan algunas pruebas de consistencia interna. Hace dos décadas la descripción de la estructura de la materia se volvió más precisa debido a una naciente rama de las matemáticas, la geometría fractal. Mandelbrot en 1975 denominó fractales al conjunto de formas que, generadas normalmente por un proceso de repetición, se caracterizan por: tener el mismo aspecto en cualquier escala de observación, tener longitud infinita, no ser diferenciables, exhibir dimensión fraccional o dimensión fractal (14). Mandelbrot introdujo un enfoque matemático para estos problemas y usó la palabra “*fractal*” para estos irregulares y fragmentados eventos. La aplicación del enfoque fractal ha sido posible debido al potente desarrollo de equipos de análisis de imagen y programas computacionales. Aunque existen muchas limitaciones para el uso de la geometría fractal en fractografía los conceptos subyacentes proporcionan una herramienta valiosa para la comprensión de algunos aspectos de la materia. Se han hecho intentos para correlacionar los parámetros fractales de fenómenos de fractura con el desempeño de la ingeniería de materiales. (13).

En 1961 Richardson se preguntó qué longitud tendría la costa británica, esta pregunta podría ser contestada tomando un buen mapa y un conjunto de divisores para marcarlos entre toda la costa británica y determinar su longitud. Un poco de reflexión revela que la longitud, medida de esta manera, depende de la unidad de longitud de la medición. La misma idea se aplica a la superficie de fractura de la figura 12.

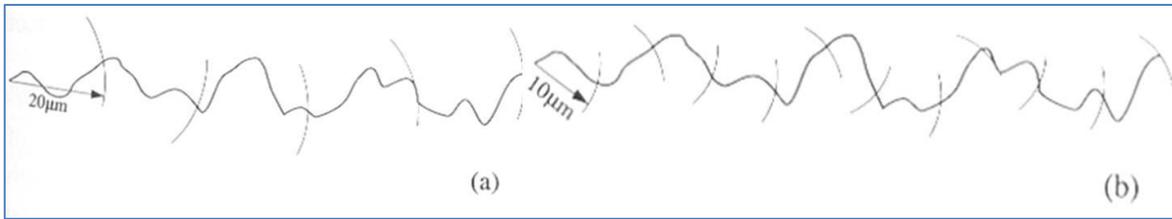


Figura 12. Determinación de la longitud de una línea irregular (perfil de fractura) usando divisores (13).

La longitud de la línea irregular en la figura 12a se midió usando un divisor de $r=20\mu\text{m}$ y se requieren 5 pasos. La misma línea medida con un divisor de $r=10\mu\text{m}$ requiere 11 pasos (figura 12b). Por lo tanto la longitud medida, $L(r)$, es $100\mu\text{m}$ para $r=20\mu\text{m}$ y $110\mu\text{m}$ para $r=10\mu\text{m}$. Tenemos en cuenta que la forma del perfil de la superficie de fractura y el método de medición, indica que hay un factor estadístico fuerte en la determinación de $L(r)$ (13).

En la geometría fractal la relación entre $L(r)$ y r es una medida de la rugosidad. La dimensión fractal se obtiene graficando $\log L(r)$ contra $\log r$. Si la gráfica es lineal la relación entre $L(r)$ y r se puede escribir como:

$$L(r) = Ar^{-(D-1)}$$

Donde A es una constante y la pendiente de $\log L(r)$ contra $\log r$ es $(1-D)$. D es la dimensión fractal y tiene un valor entre 1 y 2.

La fractografía también hizo una importante contribución a los primeros días de la cristalografía. En el siglo XIX René-Just Haüy observó que cuando los cristales eran fracturados, sus superficies eran paralelas a los planos originales, lo que indica un orden interior y simetría: la base de la cristalografía. En 1896 Woodworth publicó una clasificación de las características de las superficies en base a las observaciones de las grietas recién expuestas. Estas superficies no habían sufrido los estragos del tiempo. La clasificación todavía tiene una considerable validez para las fracturas de roca y es igualmente aplicable a las fracturas en muchos otros materiales frágiles (13).

El trabajo de Fréminville publicado en 1914, en el comportamiento de las fracturas de los sólidos cristalinos frágiles, particularmente vidrios de silicato inorgánico, es la obra más destacada en fractografía en cualquier material. Se cubre una gran cantidad de fenómenos importantes. Las fotomicrografías y dibujos ilustrativos se combinan para proporcionar una comprensión detallada de la influencia de las tensiones estáticas y dinámicas sobre los cambios topográficos asociados con la nucleación y la propagación de grietas, y en el camino de la fractura en una amplia gama de geometrías de prueba.

Zapffe, con el apoyo de muchos compañeros de trabajo, fue el primero en explorar en detalle la naturaleza de clivaje en los metales, utilizando microscopía de luz. Los metales son generalmente considerados como los materiales resistentes y dúctiles. Zapffe hizo su primer descubrimiento aproximadamente en 1943 en una investigación de la influencia de hidrógeno disuelto haciendo aceros normalmente dúctiles a frágiles (13).

El progreso y el grado de sofisticación de la fractografía comenzaron a crecer con las mejoras en microscopía. El microscopio de baja luz usaba una magnificación de 30x y se utilizó a mitad del siglo XVII, el único medio de detalles de registro en ese momento era por dibujos. Los bocetos fueron reproducidos por las técnicas de grabado para su publicación. La mayoría de las superficies de fractura no son ni suaves ni planas. En este sentido, el desarrollo de técnicas de réplica combinados con Microscopía Electrónica de Transmisión (MET) a mediados de 1950 y el desarrollo comercial de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en la década de 1960 revolucionó el estudio de superficies de fractura debido a la mejora en la profundidad de campo y el aumento del rango de magnificaciones (13).

1.6 Patrones y mecanismos de fractura en los materiales

1.6.1 Patrones y mecanismos de fractura en metales

La fractura en aleaciones metálicas en ingeniería se puede producir de manera transgranular (a través de los granos) o intergranular (a lo largo de los límites de grano) tal como se mencionó al inicio del capítulo. Sin embargo, independientemente de la fractura, hay esencialmente sólo cuatro modos de fractura principales: "*dimple rupture*", "*cleavage*", fatiga y ruptura decohesiva. Cada uno de estos modos tiene características de fractura en la superficie y un mecanismo o mecanismos por los que la fractura se propaga (12).

Cuando la sobrecarga es la causa principal de fractura, las aleaciones estructurales más comunes fallan por un proceso conocido como coalescencia de micro-huecos. Los micro-huecos son nucleados en zonas localizadas de deformación discontinua asociadas con la presencia de partículas de segunda fase, inclusiones, límites de grano y dislocaciones ó apilamientos. A medida que la tensión en el material aumenta, los micro-huecos crecen, se unen, y, finalmente, forman una superficie de fractura continua. Este tipo de fractura presenta numerosas depresiones en forma de copa que son el resultado directo de la coalescencia de microhuecos. Las depresiones en forma de copo se conocen como hoyos, y el modo de fractura se conoce como "*dimple rupture*" (12). La figura 13 muestra la influencia de la dirección de la carga.

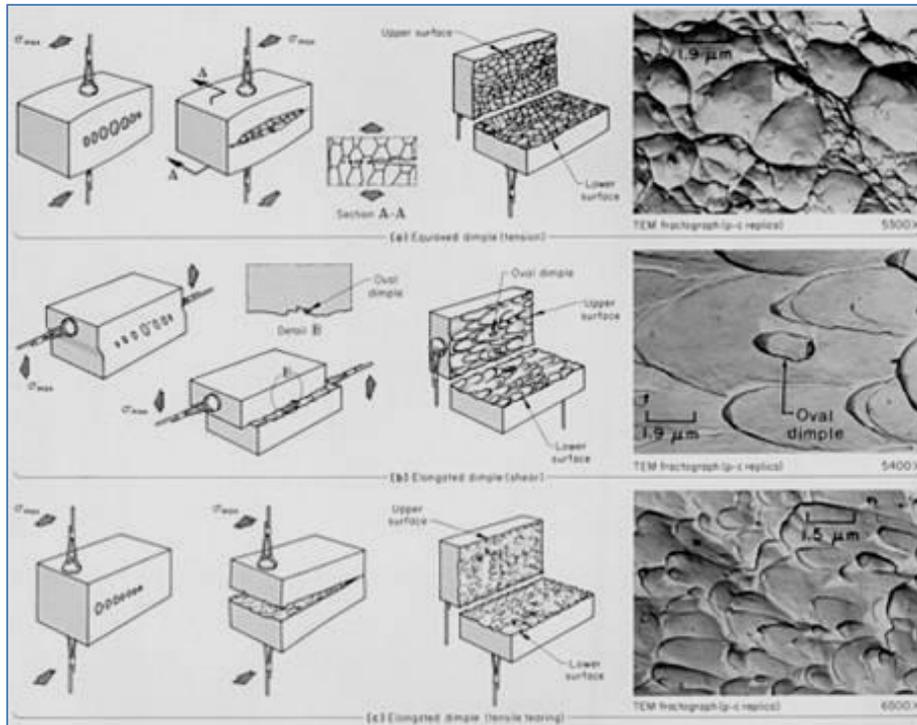


Figura 13. Influencia de la dirección del esfuerzo máximo (σ_{max}) en las formas de hoyos formados por coalescencia de microhuecos. (a) En tensión, presenta hoyos equiaxiales que se forman en ambas superficies de la fractura. (b) En cizallamiento, se observan hoyos alargados apuntando en direcciones opuestas en la coincidencia de superficies de fractura. (c) En la tracción lagrimeo, hoyos alargados apuntan hacia el origen de la fractura en la coincidencia de superficies de fractura (12).

Las imágenes del lado derecho son fracturas reales de materiales donde se puede apreciar la diferencia de superficies de fractura entre la tensión formando hoyos, el modo cortante que causa que las superficies de los hoyos se alarguen y el efecto de "tearing".

El tamaño del hoyo en una superficie de fractura que se rige por el número y la distribución de micro-huecos que se nuclean. Cuando los sitios de nucleación son escasos y muy separados entre sí, los micro-huecos crecen hasta un tamaño grande antes de coalescencia y el resultado es una superficie de fractura que contiene grandes hoyos. Se forman hoyos pequeños cuando se activan numerosos sitios de

nucleación y micro-huecos adyacentes antes de que tengan la oportunidad de crecer a un tamaño más grande.

El clivaje, "*cleavage*", es una fractura de baja energía que se propaga a lo largo de planos cristalográficos bien definidos conocidos como planos de clivaje. Teóricamente, una fractura de clivaje debería tener perfectas superficies de fractura y ser completamente plana. Sin embargo, las aleaciones son materiales policristalinos que contienen granos secundarios, inclusiones, dislocaciones, y otras imperfecciones que afectan la fractura de clivaje, rara vez se observa una fractura sin rasgos o patrones de fractura debido a estas causas. Estas imperfecciones y los cambios en la orientación en la red cristalina, como la posible falta de coincidencia de los planos de bajo índice de todo grano o subgranos, producen distintas superficies de fractura de clivaje, por ejemplo: "*cleavage steps*", patrones de río (*river patterns*), marcas de pluma (*feather markings*), líneas de Chevron y marcas de lengua (*tongues*) (12).

La figura 14 muestra dos ejemplos claros de superficies de fractura por clivaje, la figura 14a es un patrón característico de la inclinación del plano, donde se observan marcas de río y pasos de clivaje (*cleavage steps*), en la figura 14b se aprecian superficies de lenguas (*tongues*).

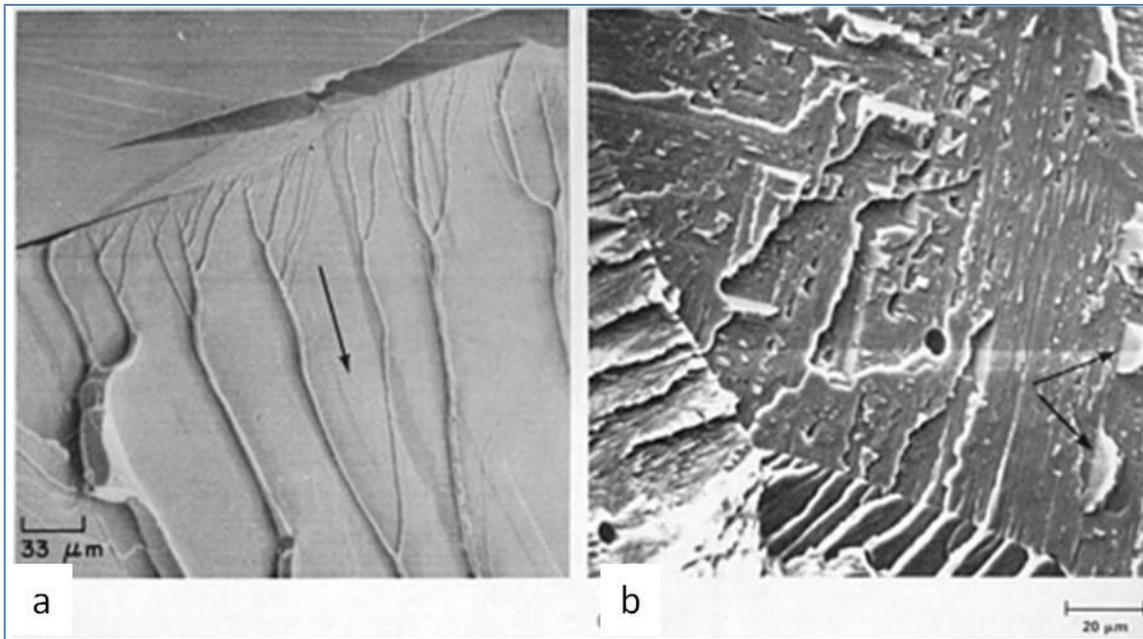


Figura 14. Superficies de fractura por clivaje. (a) Se presentan, "cleavage steps" y marcas de río en un hierro con 0.01 de C-0.24Mn-0.02Si que fue fracturado por impacto. (b) Se tienen superficies de lenguas (flechas) en un acero con 30% de Cr soldado y fracturado por clivaje (12).

Las fracturas de lenguas (*tongues*) se forman cuando una rotura de fractura se desvía del plano de clivaje y se propaga a una corta distancia a lo largo de una orientación doble.

Una fractura que es el resultado de la carga repetitiva o cíclica se conoce como una fractura por fatiga. Una fractura por fatiga generalmente se produce en tres etapas: se inicia durante la etapa I, se propaga durante la mayor parte de su longitud durante la etapa II, y procede a la fractura catastrófica durante la etapa III.

El inicio de la grieta y el crecimiento durante la primera etapa se produce principalmente por deslizamiento del plano debido a retrocesos repetitivos de los sistemas de deslizamiento activos en el metal. El crecimiento de la grieta es influenciado por la microestructura y el esfuerzo real, y el 90% de la resistencia a la fatiga puede ser consumida en la iniciación de una grieta.

La grieta tiende a seguir los planos cristalográficos, pero cambia su dirección por discontinuidades en el material, por ejemplo las fronteras de grano. Una típica etapa I de la fractura por fatiga se muestra en la figura 15. Las superficies de fractura de la etapa I son facetas, a menudo se asemejan al clivaje, y no presentan estrías de fatiga. La etapa I de fatiga se observa en altos ciclos de cargas de bajos esfuerzos y está frecuentemente ausente en la fatiga de bajos ciclos y de altos esfuerzos.

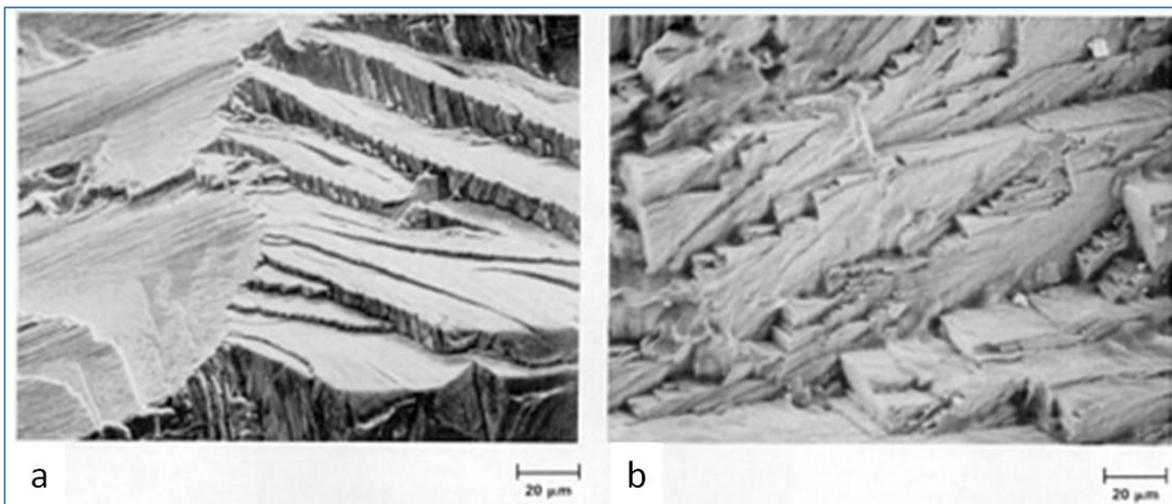


Figura 15. Apariencia de fatiga de etapa I en figura 15a, parecida al clivaje, orientada cristalográficamente en una aleación Ni-14Cr-4.5Mo-1Ti-6Al-1.5Fe-2.0 (Nb+Ta). Figura 15b superficie de fractura de estrías en pasos, indica que es fatiga en etapa I en aleación de base cobalto (12).

Las fracturas por fatiga generadas durante la etapa II por lo general exhiben marcas conocidas como estrías por fatiga (figura 16 y 17), que son un registro visual de la posición del frente de la grieta durante la propagación a través del material.

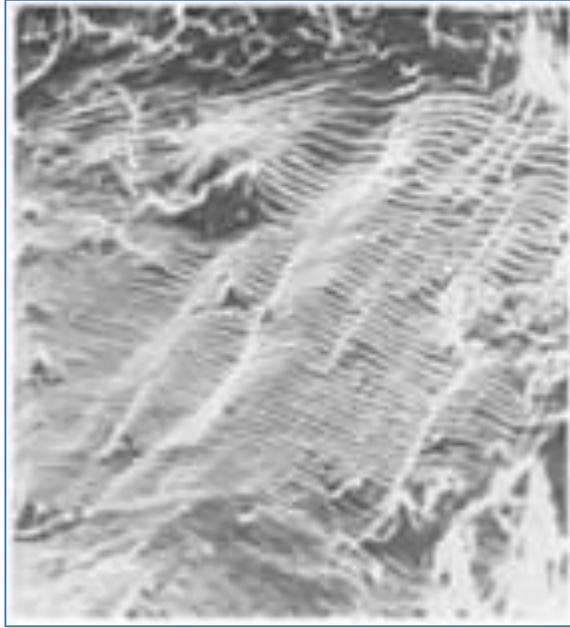


Figura 16. Variaciones locales en el espaciamiento de estrías en una aleación de Ni-0.04C-21Cr-0.6Mn-2.5Ti-0.7Al que fue probado en condiciones de flexión rotativa (12).

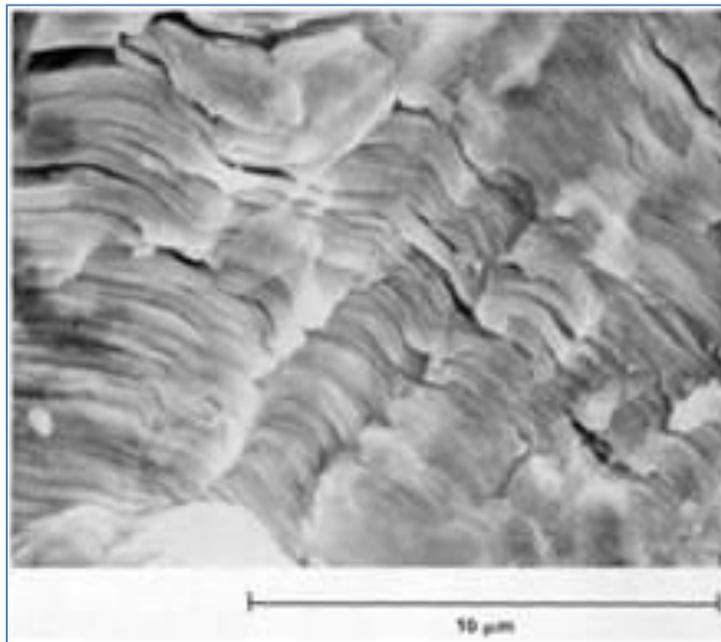


Figura 17. Estrías de fatiga en la superficie de fractura de un tubo de intercambiador de calor de tantalio. El aspecto de la superficie rugosa es debido al agrietamiento secundario causado por la fatiga de alto ciclo y baja amplitud (12).

La etapa III es la fase terminal de la propagación de una grieta de fatiga en el que el modo de formación de estrías es desplazado progresivamente por los modos de fractura estáticos, tales como “*dimple rupture*” y clivaje. La tasa de crecimiento de la grieta aumenta durante la Etapa III hasta que la grieta por fatiga se vuelve inestable y la pieza falla, esta etapa es sensible tanto a la microestructura y al esfuerzo real (12).

Una fractura se conoce como rotura decohesiva cuando exhibe poca o ninguna deformación plástica mayor (figura 18 y 19) y no se produce por “*dimple rupture*”, “*cleavage*”, o fatiga. Este tipo de fractura es generalmente el resultado de un entorno reactivo o una microestructura única y está asociada casi exclusivamente con la ruptura a lo largo de los límites de grano. Los límites de grano contienen los componentes de punto de fusión más bajos del sistema de aleación. También son caminos fáciles para la difusión y sitios para la segregación de los elementos tales como el hidrógeno, azufre, fósforo, antimonio, arsénico, y de carbono; los iones haluro, tales como cloruros, así como las rutas de penetración por parte de los metales de bajo punto de fusión, tales como galio, mercurio, cadmio y estaño. La presencia de estos constituyentes en los límites puede reducir significativamente la fuerza de cohesión del material en los límites y promover la ruptura decohesiva. La ruptura decohesiva no es el resultado de un proceso de fractura único y puede ser causada por varios mecanismos diferentes. Los procesos de decohesión implican el debilitamiento de los enlaces atómicos, la reducción de energía en la superficie requerida para la deformación localizada, la presión del gas molecular la ruptura de las películas protectoras, y la disolución anódica en los sitios activos, todos estos asociados con la fragilización por hidrógeno y agrietamiento por tensión de corrosión (12).

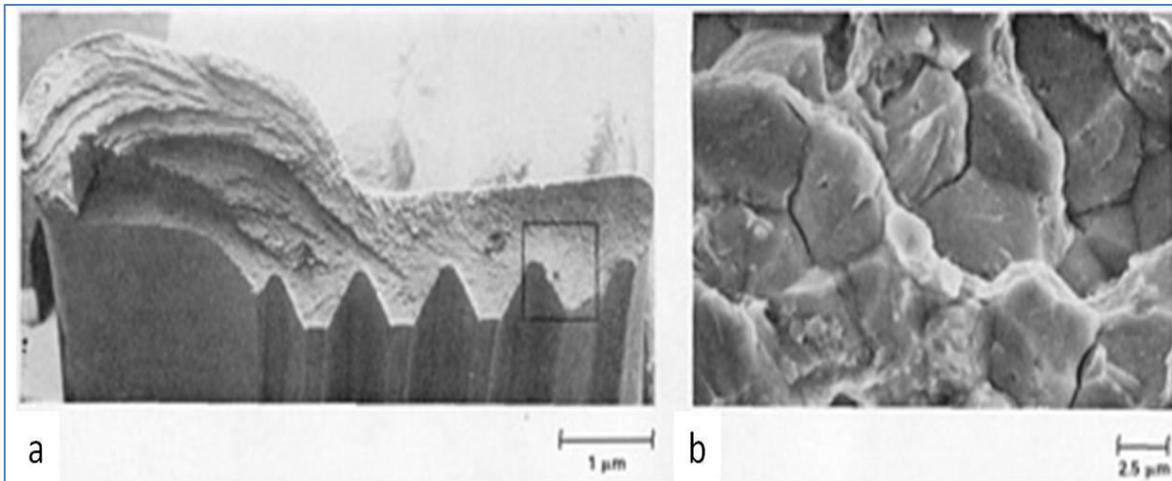


Figura 18. Ruptura decohesiva en una tuerca de acero AISI 8740 debido a la fragilización por hidrógeno. Figura 18a vista a nivel macro de la superficie de fractura. Figura 18b alta magnificación de la fractura intergranular (12).

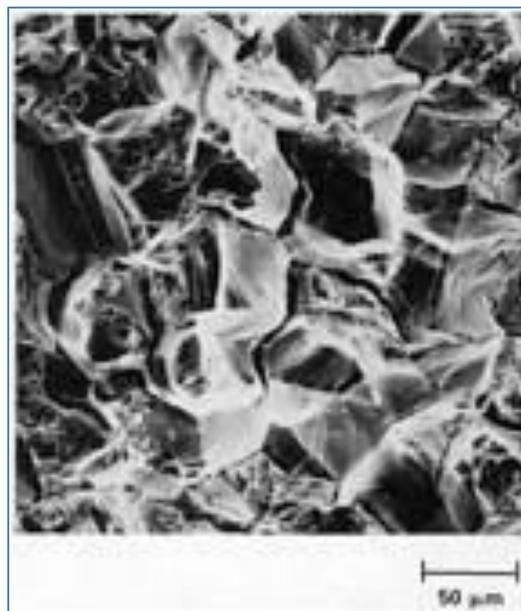


Figura 19. Superficie de fractura de una probeta de Monel que falló en mercurio líquido. La fractura intergranular es predominante con alguna contribución de fractura transgranular (12).

1.6.2 Patrones y mecanismos de fractura en cerámicos

En muchas aplicaciones, la fractura frágil limita el uso de los materiales cerámicos. En la industria electrónica, por ejemplo, los cerámicos son usados como sustratos y dieléctricos por sus propiedades eléctricas, sin embargo, el fracaso en estas aplicaciones a menudo es causada por la fractura por fragilidad, que resulta de la falta de coincidencia de expansión térmica entre las partes cerámicas y metálicas de los paquetes electrónicos.

Para entender el comportamiento de fractura de los materiales cerámicos, es necesario entender los mecanismos de fractura de estos materiales que son completamente frágiles, un ejemplo es la figura 20. En estos materiales la deformación plástica mediante el movimiento de dislocaciones no sucede, o se produce a una extensión limitada de tal manera que las grietas son nítidas a nivel atómico del sólido. La resistencia a la fractura es proporcionada por la misma red cristalina, y no por el movimiento de las dislocaciones (15).

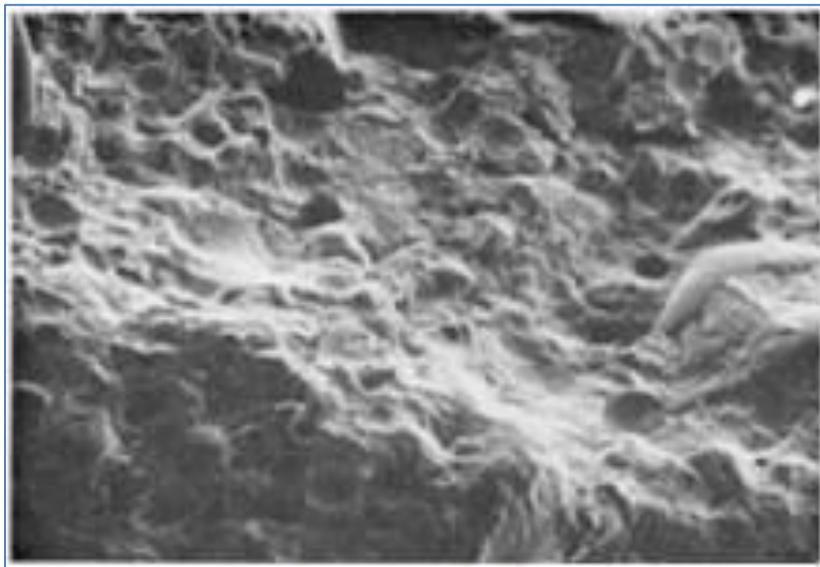


Figura 20. Imagen obtenida por electrones retrodispersados (BE) de una superficie de concreto con huecos no interconectados entre sí, 17 × (12).

Un ejemplo importante de fractografía en materiales cerámicos son los patrones "mirror", "mist" y "hackle". Este fenómeno es una buena herramienta para el estudio de problemas de fractura. La figura 21 muestra este tipo de patrón en una superficie de fractura de vidrio inorgánico que fue sometido a tensión.

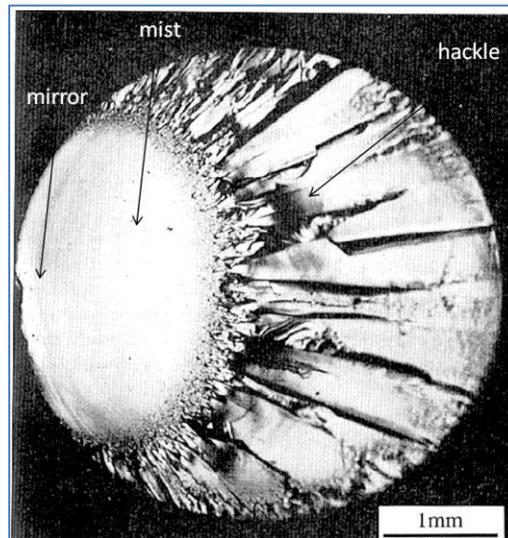


Figura 21. Patrón de fractura "mirror", "mist" y "hackle" en una probeta de vidrio sometida a tensión. (13).

Los siguientes fenómenos son identificados en este tipo de patrón de fractura:

1. Los cambios de apariencia en la superficie de fractura están asociados con el incremento de la rugosidad en la superficie.
2. Las transiciones de "mirror" a "mist" y de "mist" a "hackle" no están alineadas, el fenómeno está relacionado con los cambios progresivos de la rugosidad de la superficie.
3. Los cambios en la rugosidad son secuenciales y están asociados con el cambio de la longitud de las grietas.

En la figura 22 se tiene un esquema del patrón "mirror", "mist" y "hackle" generado en una muestra (con muesca) ensayada en tensión, la muesca provoca que exista una concentración de esfuerzos en la punta de la grieta, al cumplirse la condición

de Griffith, la grieta comenzará a propagarse bajo carga constante y así la longitud de la grieta se incrementará, lo que significa que se generará una fractura inestable. Los valores altos de esfuerzos y la gran cantidad de energía liberada rápidamente producen mucha actividad micromecánica en la punta de la grieta y el incremento de la rugosidad en la superficie lo que da como resultado este tipo de patrón.

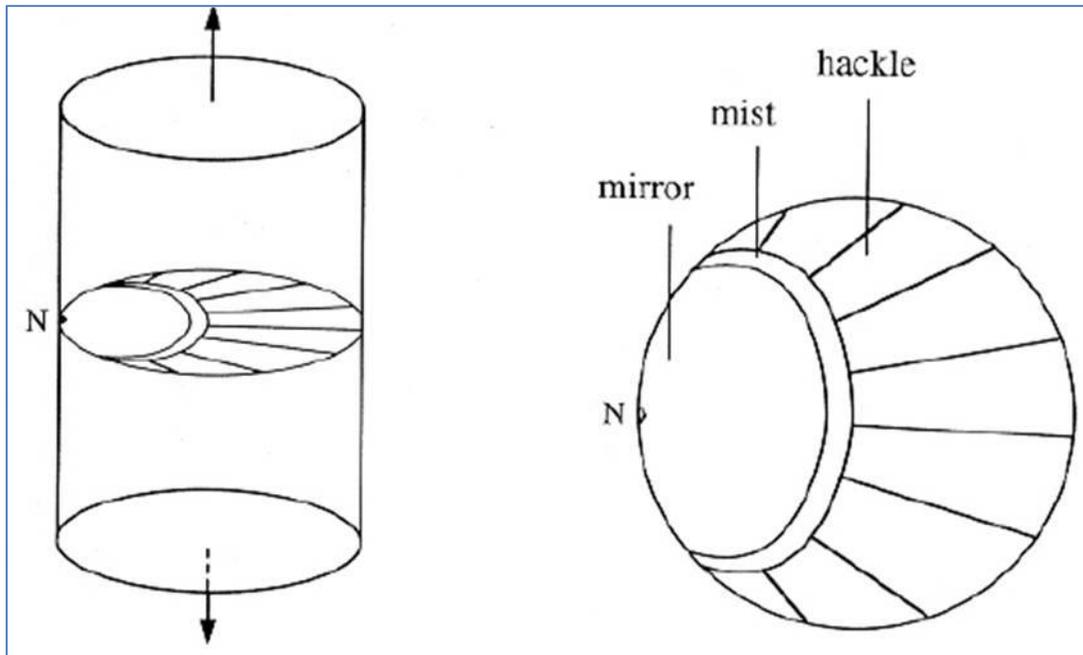


Figura 22. Esquema del desarrollo del patrón "mirror", "mist" y "hackle" en tensión (13).

1.6.3 Patrones y mecanismos de fractura en polímeros

En el caso de los materiales poliméricos, en un experimento de esfuerzo - deformación, la pieza se deforma hasta que se fractura, estos ensayos normalmente se realizan a baja velocidad en mm/s; la prueba para determinar la resistencia al impacto también utiliza velocidades bajas en m/s. En ambas pruebas, la energía es absorbida dentro de la probeta por la deformación viscoelástica de las cadenas poliméricas y finalmente por la creación de nuevas áreas de superficie. La energía puede ser absorbida por "shear yielding", "crazing" y agrietamiento. Es importante distinguir cuando es una grieta y cuando es un patrón llamado "craze". Cuando el

esfuerzo es aplicado a un polímero, la primera deformación genera un flujo cortante a las últimas moléculas del polímero, si se encuentra por encima de su T_g (temperatura de transición vítrea) o por la flexión y estiramiento en polímeros vítreos. Eventualmente la grieta comenzará a formarse en un tipo de defecto, después se propagará a alta velocidad, causando una falla catastrófica. El efecto "craze" no es una grieta o fisura abierta, es un efecto generado por fibras muy delgadas del polímero que mantiene junta la pieza de arriba hacia abajo y que su formación es debido al surgimiento de micro-huecos en las fibras hasta que la pieza fractura (16). La figura 23 muestra un ejemplo del efecto "craze". En la figura 24 se observa una fractura dúctil de un polímero, el material presenta un patrón que es llamado fibrilación, es característico por la apariencia de deformación plástica en la superficie, la figura 25 y 26 presentan patrones conocidos como marcas de llantas, resultado de esfuerzos por fatiga.

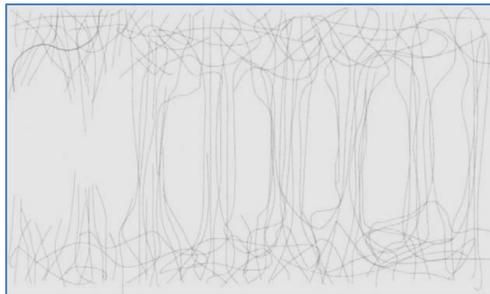


Figura 23. Efecto craze, patrón característico en los polímeros bajo la acción de una carga (10).

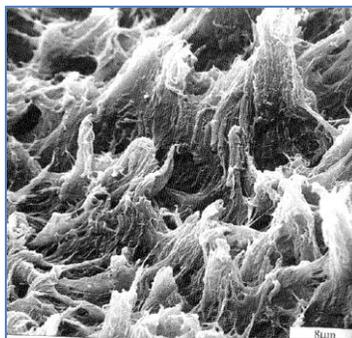


Figura 24. Superficie de fractura de un co-polímero moldeado por inyección fracturado a tensión a una temperatura de 273K (13)

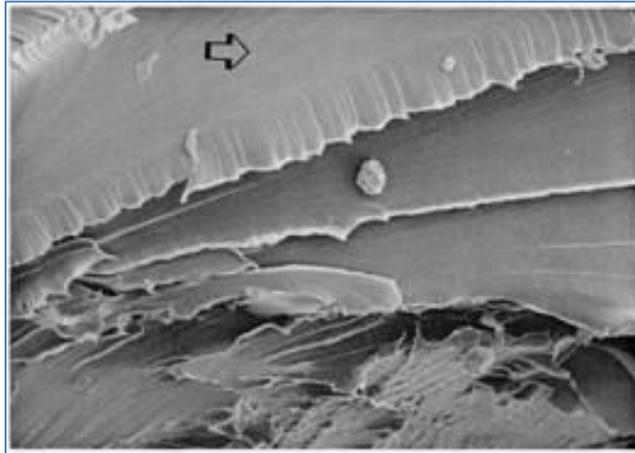


Figura 25. Fractura frágil por fatiga en una hoja delgada 3.22 mm de espesor de policarbonato. La flecha indica la dirección de la fractura. La probeta presenta patrones frágiles y dúctiles de fractura, mecanismos de microgrietas y fibrilación. Se observa patrones de río, marcas de llantas durante el proceso de fatiga, 300X (12)

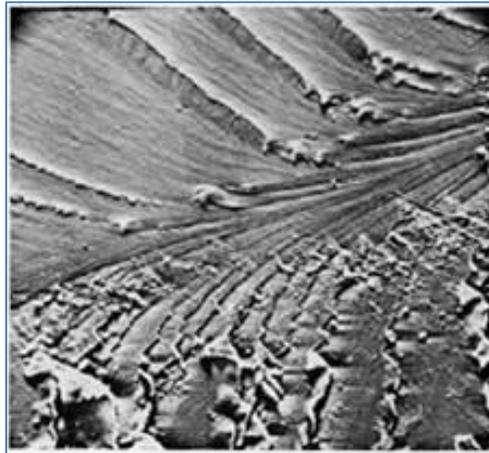


Figura 26. Superficie de fractura de una probeta de poliamida, la probeta presenta patrones de Chevron MEB 240X. (12)

Capítulo 2. Materiales compuestos

2.1 Introducción a los materiales compuestos

Durante mucho tiempo se ha estudiado a los materiales metálicos, cerámicos y hace algunas décadas a los polímeros. De todos estos materiales se tiene un conocimiento muy amplio de sus características, composiciones, patrones y mecanismos de fractura, pero en los materiales compuestos aún no se llega a ese amplio conocimiento, aunque es importante comenzar a desarrollarlo ya que tendrán en los próximos años una gran proyección. Los compuestos se forman cuando dos o más materiales o fases se utilizan juntas para obtener una combinación de propiedades que no se pueden lograr de otra manera. Los compuestos se pueden seleccionar para alcanzar combinaciones no usuales de rigidez, peso, desempeño a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad (17). Una de las fases es usualmente discontinua, rígida y resistente, es el material de refuerzo, la otra fase que es menos rígida y menos resistente es la matriz (18).

Las propiedades del material compuesto dependen de las propiedades de los constituyentes, su geometría y la distribución de las fases. Uno de los más importantes parámetros es la fracción de volumen del material de refuerzo. La distribución del refuerzo determina la homogeneidad del material. Entre menos uniforme sea la distribución del material de refuerzo, más heterogéneo será el material compuesto y mayor la dispersión de las propiedades y la probabilidad de fractura en las áreas frágiles (18).

2.2 Clasificación de los materiales compuestos

Los materiales compuestos de dos fases se clasifican en tres categorías dependiendo del tipo, geometría y orientación del material de refuerzo, podemos clasificar los materiales compuestos en base a su matriz: metálica, cerámica y polimérica, cada una de estas matrices pueden tener diversos refuerzos normalmente son partículas, laminados o fibras. La figura 27 muestra un esquema del material de refuerzo en la matriz.

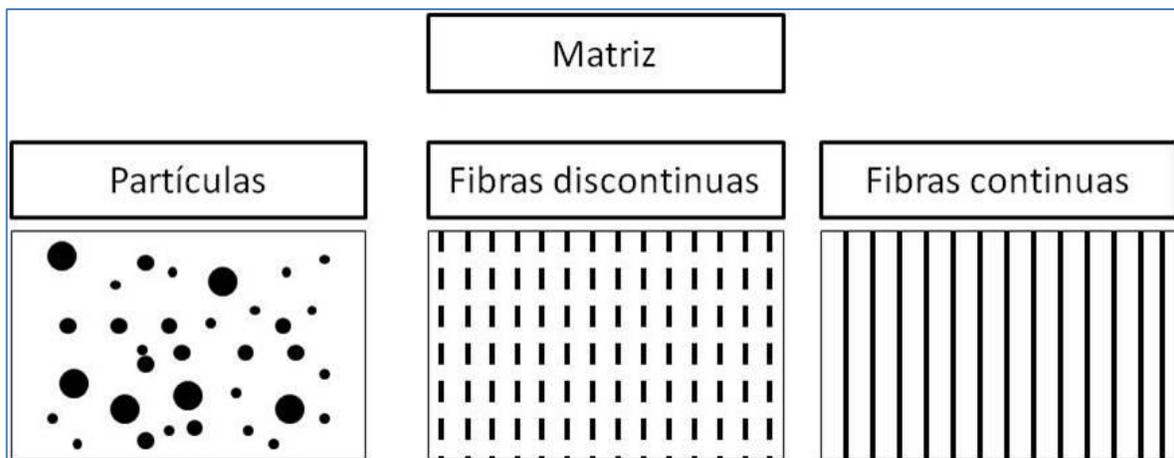


Figura 27. Clasificación de materiales de refuerzo en la matriz (18).

Los compuestos particulados consisten en partículas de varios tamaños y formas dispersados de manera aleatoria en la matriz. Algunos ejemplos de estos compuestos son el concreto, vidrio reforzado con escamas de mica, polímeros frágiles reforzados con partículas de caucho, partículas en matrices no metálicas (18).

Los compuestos discontinuos pueden contener fibras cortas, nanotubos o whiskers como refuerzo. Estas fibras pueden variar en su diámetro y estar orientadas hacia una dirección específica ó de manera aleatoria. Un ejemplo son los nano compuestos reforzados con nanotubos de carbón (aproximadamente 1 nm en diámetro y 1000 nm en longitud) (18).

Los compuestos reforzados con fibras continuas son compuestos más eficientes desde el punto de vista de resistencia y rigidez. Las fibras pueden ser todas paralelas, es decir, todas orientadas hacia una misma dirección, pueden ser orientadas a determinado ángulo una de otra ó pueden ser orientadas hacia muchas direcciones. (19)

La tabla 4 muestra la clasificación de los compuestos reforzados con fibras así como los tipos de refuerzo y los tipos de matrices que se usan generalmente.

Tabla 4. Tipos de materiales compuestos reforzados con fibras (18)			
Tipo de Matriz	Fibra	Matriz	
Polimérica	Vidrio E (E-glass)	Epóxica	
	S-glass	Fenólica	
	Carbono (grafito)	Poliamida	
	Aramida (Kevlar)	Bismaleimida	
	Boron	Poliéster	
			Termoplásticos
	Metal	Boro	Aluminio
Borsic (Boro recubierto con SiC)		Magnesio	
Carbono (grafito)		Titanio	
Carburo de silicio		Cobre	
Alúmina			
Cerámica	Carburo de silicio	Carburo de silicio	
	Alúmina	Alúmina	
	Nitruro de silicio	Vidrio-cerámico	
		Silicón nitrato	
Carbono	Carbono	Carbono	

2.3 Historia de los materiales compuestos

Los materiales convencionales que conocemos los podemos clasificar en tres categorías: metales, cerámicos y polímeros, se mencionó anteriormente que los materiales compuestos son aquellos que resultan de una combinación de los materiales antes mencionados para mejorar las propiedades. El uso de los metales comenzó con el oro, posteriormente el cobre, bronce y acero. En el pasado siglo se comenzó a utilizar el acero y el aluminio hasta hoy en día, sin embargo actualmente hay una tendencia en el uso de polímeros y los materiales compuestos.

La resina fenólica reforzada con fibras de asbesto fue introducida apenas el siglo pasado, el primer bote hecho con fibra de vidrio se fabricó en el año 1942, acompañado con plásticos reforzados para el uso de la industria aeroespacial, las primeras fibras de carbono de alta resistencia con boro fueron introducidas en 1960 y el Kevlar en 1973 (18).

Al final de los 1970's las aplicaciones de materiales compuestos se fueron expandiendo a mercados tales como la industria aeroespacial, marítima, automotriz, artículos deportivos e instrumentos biomédicos. Los 1980's marcaron un significativo incremento en la utilización de fibras de alto módulo, lo que ocasionó que en los 1990's la industria tuviera una expansión en infraestructura. Hoy en día una nueva frontera está abierta; los nanocompuestos. El amplio potencial de los nanocompuestos, sigue en investigación (18). La figura 28 muestra la primer carrocería fabricada con materiales compuestos en 1953 en la industria automotriz para un Porsche (19).



Figura 28. Primer carrocería fabricada con materiales compuestos para un Porsche en 1953 (19).

2.4 Fabricación de los materiales compuestos

Existen varias técnicas para la fabricación de materiales compuestos. El trabajo de los ingenieros es el de seleccionar el proceso correcto, condiciones del proceso adecuadas, tasa de producción y costos para cada una de las aplicaciones. El ingeniero debe tener un amplio conocimiento de los beneficios y limitaciones de cada técnica (20).

La técnica más práctica de ellas es la de *layup*, cuando la aplicación requiere de especificaciones más precisas como las de industria militar, aeroespacial, automotriz ó artículos deportivos se requiere de métodos de fabricación más especializados, los más frecuentes son: *Resin Transfer Molding (RTM)*, *autoclave* y *filament winding*.

El proceso *layup* consiste en disponer las fibras sobre un molde previamente elaborado, las fibras se impregnan (*prepeg*) de resina con brocha o rodillo, posteriormente 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, en la cual la fibra está en una o dos direcciones. En este método, el curado se realiza al 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. (21)

El término *prepeg* ó *pre-impregnado* 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, un ejemplo de pre-impregnado es en el proceso *filament winding*, las fibras pasan a través de un contenedor de resina (20).

En el método de bolsa de vacío, presión o autoclave se suele utilizar como material base los *pre-preg*(*preimpregnado*), 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 (21). La figura 29 muestra la preparación de los materiales para usar está técnica y posteriormente el curado en el autoclave.

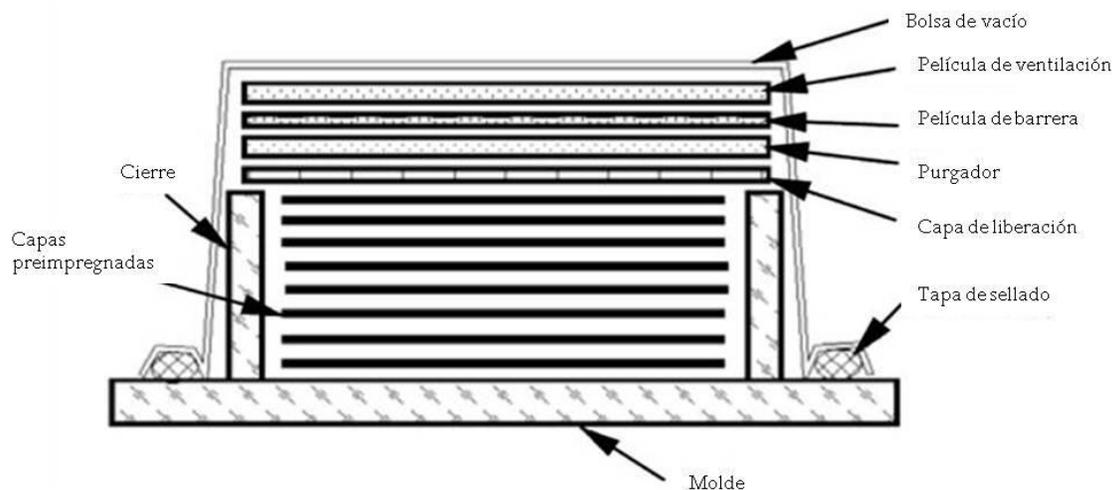


Figura 29. Preparación para el curado y la consolidación del material (20).

Los pasos necesarios en el autoclave de la figura 29 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 (20).

La figura 30 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°C/min a 4°C/min hasta llegar a los 140°C aproximadamente dejando el sistema a esa temperatura por dos horas aproximadamente, después se eleva la temperatura a 170°C aproximadamente para el curado del material compuesto, así como también la presión durante dos horas, por último viene el enfriamiento a 3°C/min.

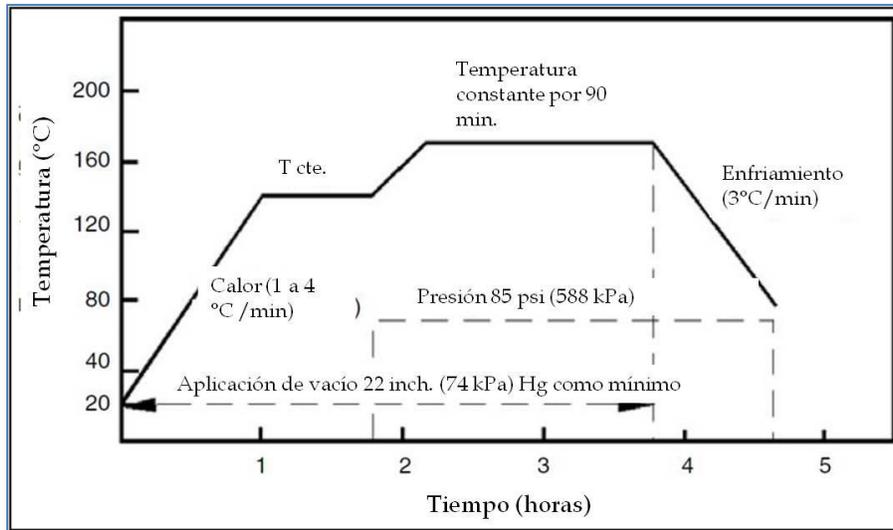


Figura 30. Ciclo de curado en el proceso de autoclave (20).

El proceso *filament winding* emplea fibras continuas en un baño de resina, enrollándolos sobre un molde giratorio que dispone del mecanismo adecuado para orientar la fibra con el ángulo deseado 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 (21). La figura 31 es un diagrama de esta técnica.

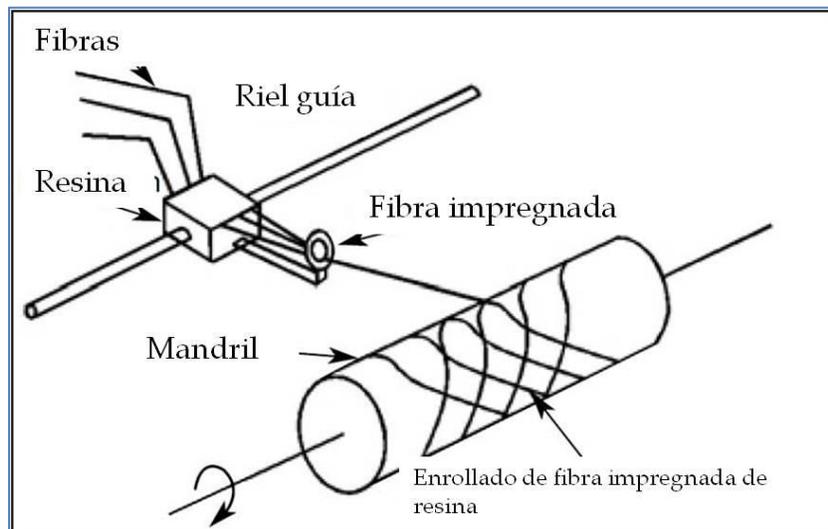


Figura 31. Técnica "Filament winding" (20).

El método RTM (*Resin Transfer Molding*) es conocido como un proceso de moldeo por transferencia de líquido. Aunque los procesos de moldeo por inyección y compresión han ganado popularidad por su alto volumen de producción, su uso es limitado en aplicaciones no estructurales por los componentes que se utilizan (fibras cortas). El proceso RTM tiene la ventaja de un buen costo-efectividad de producción en partes estructurales en volúmenes medios, usando bajo costo en maquinados, así mismo se usan fibras continuas para este proceso. La figura 32 muestra un esquema de este proceso, la preforma se coloca en la cavidad del molde, el molde se compone por dos mitades que se juntan como un sándwich, posteriormente se vierte la resina, catalizador, color y los demás constituyentes del compuesto por medio de varias entradas, las mitades se cierran a presión, durante un curado de 6 a 30 minutos, dependiendo de la cinética de curado, finalmente, la parte es quitada del molde. Con este proceso se obtiene partes con buena calidad superficial en ambos lados (20).

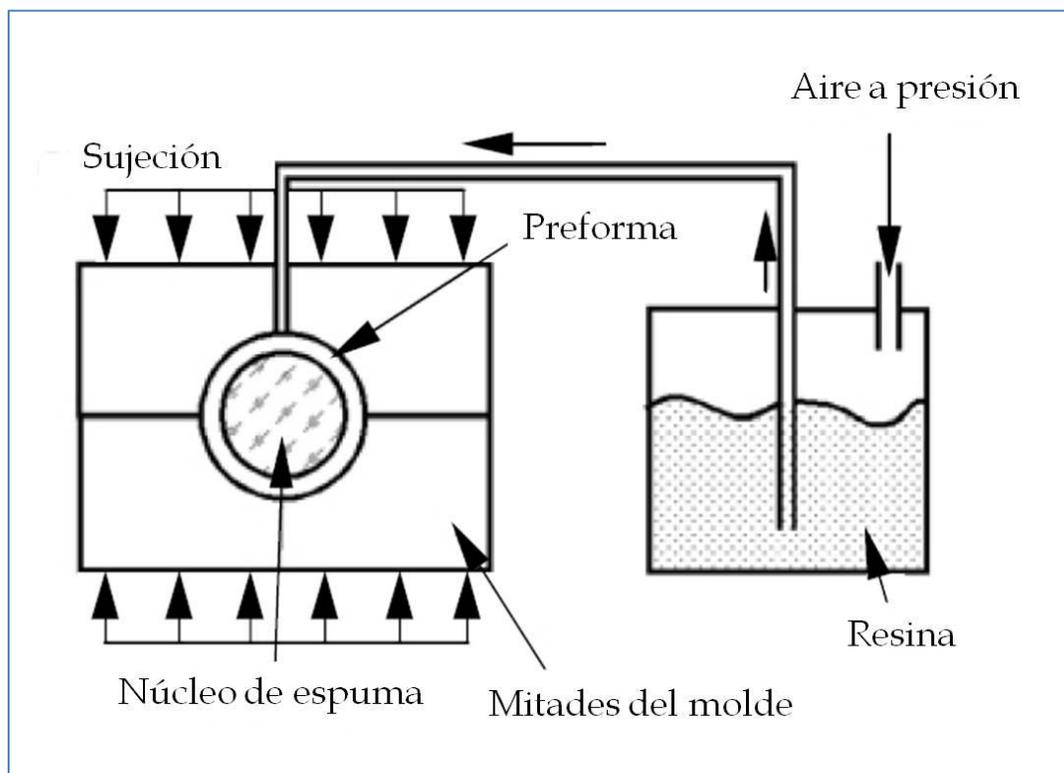


Figura 32. Esquema del proceso RTM (20).

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:

- Discontinuidades entre láminas producidas por la existencia de aire atrapado, falta de resina o de laminaciones 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.

2.5 Aplicaciones de los materiales compuestos

Las aplicaciones de los materiales compuestos, como se mencionó con anterioridad incluyen las industrias: aeroespacial, automotriz, marítima, energía, infraestructura, armamento, biomedicina y artículos deportivos.

Existen muchas razones para el crecimiento de materiales compuestos, entre éstas se encuentran que los productos fabricados con estos materiales son muy resistentes y ligeros. Hoy en día es difícil encontrar alguna industria que no encuentre beneficio de los materiales compuestos. La industria que más demanda

el consumo de estos materiales es el de la transportación consumiendo 1.3 billones de libras en materiales compuestos en el año 2000 (20).

En las pasadas tres o cuatro décadas, existieron muchos cambios sustanciales en tecnología y requerimientos. Estos cambios generaron muchas nuevas necesidades y oportunidades, que solo fueron posibles de cubrir con los avances de nuevos materiales asociados con la tecnología avanzada de manufactura.

La industria aeroespacial fue la primera en obtener los beneficios de los materiales compuestos. Los compuestos de fibra de vidrio, carbono y Kevlar han sido fabricados y procesados para partes aeroespaciales. La industria aeroespacial comúnmente usa compuestos de fibra de carbono por sus características de alto desempeño. Las técnicas más usadas para la fabricación de esos componentes son el *layup*, *RTM*, *Filament winding* (20).

Las figuras 33 y 34 muestran los principales componentes fabricados de materiales compuestos para aviones comerciales y militares, respectivamente.

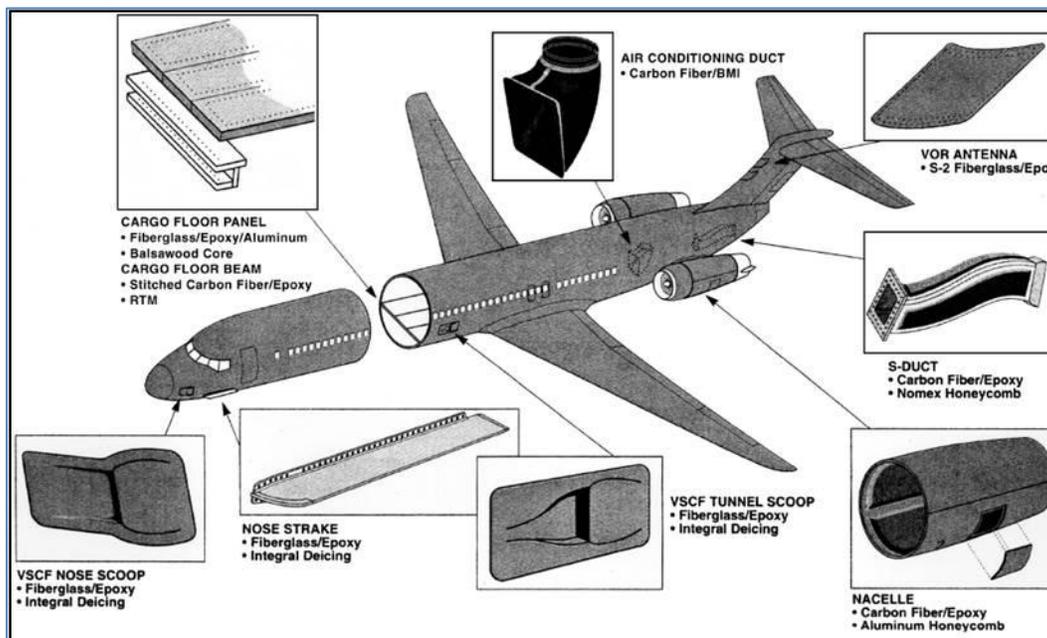


Figura 33. Principales componentes estructurales de aviones comerciales fabricados con materiales compuestos (20).

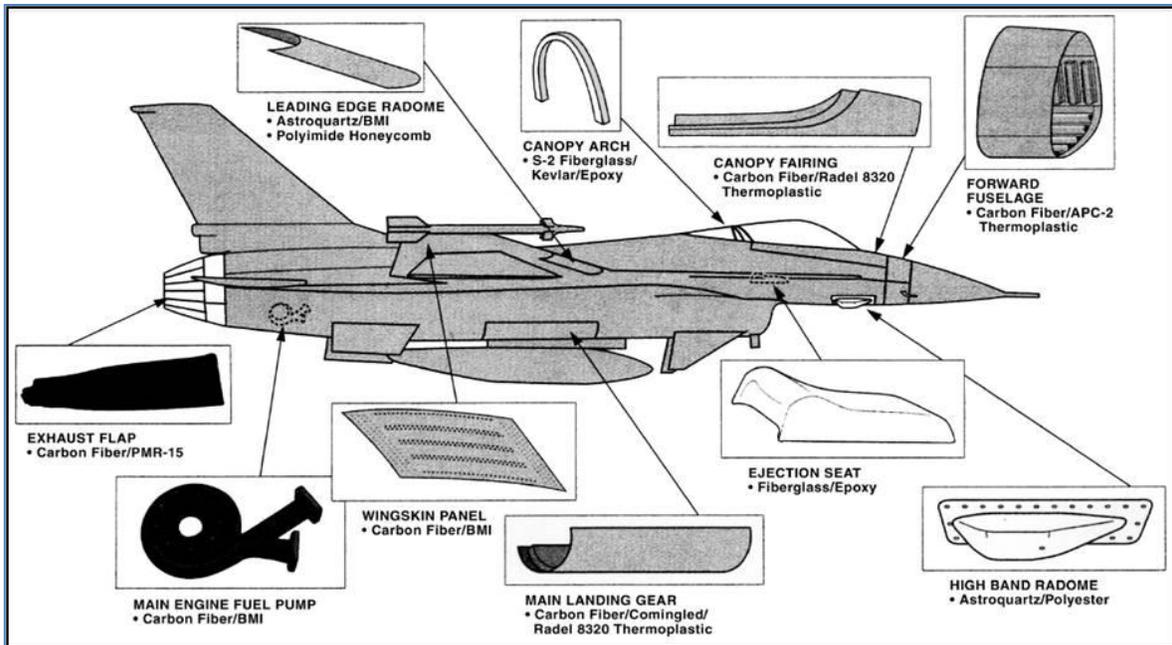


Figura 34. Principales componentes estructurales de aviones militares fabricados con materiales compuestos (20).

Por otra parte en la industria automovilística los materiales necesitan cumplir con ciertos criterios antes de ser aprobados. Algunos de los requerimientos se relacionan con el cuidado del medio ambiente. Así, en muchas ocasiones existen diversos factores que obligan a optimizar los procesos para la fabricación de materiales (22).

En la industria automovilística los materiales compuestos han sido considerados como material de opción en algunas aplicaciones de esta industria por los acabados superficiales y opciones de procesamiento. Actualmente, los paneles tienen un gran uso desde carros deportivos hasta carros pequeños, medianos e incluso camiones pesados. En el año 2000 la industria automotriz consumió 318 millones de libras de materiales compuestos. La fibra de vidrio es la más usada como refuerzo debido a que la fibra de carbono es más costosa. La tabla 5 muestra el uso de materiales compuestos, los componentes fabricados, material usado como matriz y métodos de manufactura en los años 1990's (20).

Tabla 5. Componentes automovilísticos fabricados con materiales compuestos (20).			
Aplicaciones	Uso (kg x 10 ⁶)	Matriz	Proceso de manufactura
Defensas	42	Poliéster	SMC (moldeo)
Asientos	14	Polipropileno	GMT (moldeo)
Cofres	13	Policarbonato	Moldeo por inyección
Soporte de radiador	4	Polietileno	Sopleado
Techo	4	Epóxica	Filament winding
Otros	11	Otros	Otro
Total	89	Total	Total

En aplicaciones marítimas, también son usados los materiales compuestos por ejemplo: ferry de pasajeros, botes, boyas, se prefieren por su resistencia a la corrosión y su ligero peso, aunado a la eficiencia en combustible. La mayoría de los componentes son fabricados en base a matrices poliméricas reforzadas con fibra de vidrio. Según un reporte de mercado de la industria marítima el 70% de los botes están fabricados con materiales compuestos. Con base en ese reporte, en Estados Unidos el resultado anual de botes exportados fue de \$8.85 billones USD y el total de equipo de materiales compuestos en la industria de barcos se estimó en 620 millones de libras en el año 2000 (20).

La industria de la construcción es la segunda industria en el uso de materiales compuestos, cerca del 42% de los puentes de estados Unidos necesitan

reparaciones y algunos son considerados obsoletos de acuerdo a los estándares oficiales de la *Federal Highway Administration*. La tendencia es usar fibra de vidrio y carbono para aplicaciones que estén relacionadas con los puentes, reduciendo instalación, maniobras, reparaciones, costos de tiempo de ciclo mejorando la resistencia a la corrosión y la durabilidad (20).

El incremento en el uso de materiales compuestos también ha sido en artículos deportivos y lanchas de carreras. Aquel que haya visitado una tienda de deportes se habrá dado cuenta que productos como raquetas de tenis, palos de golf, esquís y cañas de pescar están fabricadas con materiales compuestos. Estos productos son ligeros en peso y proveen un alto desempeño, que ayuda al deportista a maniobrar fácilmente (20).

En 1999 el costo total de equipos deportivos en base a la *Sporting Goods manufacturers Association* fue de \$17.33 billones USD incluyendo golf, hockey, basquetbol, beisbol, tenis, etc. El mercado de transporte (bicicletas, motocicletas, botes, trineos de nieve, y motos de agua) fue estimado en \$17.37 billones USD (20).

2.6 Propiedades de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio y carbono

2.6.1 Propiedades de la resina poliéster

Como ya se ha mencionado los compuestos están formados por el material de refuerzo y la matriz, la matriz rodea a las fibras para protegerlas de ataques químicos y el medio ambiente, así mismo tiene la función de transferir las cargas externas a las fibras. Las matrices se seleccionan según requerimientos químicos, eléctricos, flamabilidad, de medio ambiente, costos, desempeño, y manufactura (20).

Básicamente existen resinas termofijas y termoplásticas, en el presente trabajo el interés se centra en dos resinas termofijas: poliéster y epóxicas.

Las resinas termofijas una vez curadas ya no pueden repetir el proceso o volver a darles alguna forma deseada. Durante el curado, las resinas forman cadenas moleculares tridimensionales inflexibles como lo muestra la figura 35.

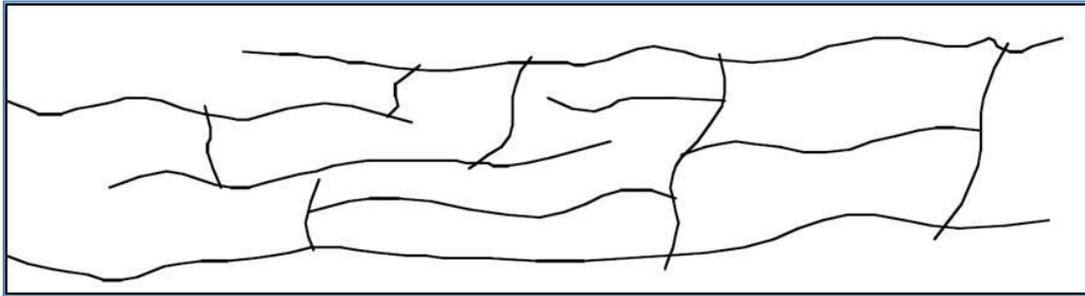


Figura 35. Moléculas de resina termoestable durante el curado.

Mientras más alto sea el número de estas moléculas, más rígido y estable térmicamente será el material. Las resinas termofijas pueden ser suaves a elevadas temperaturas, gracias a esto es factible crear curvas en estructuras tubulares. Además son rígidas y generalmente se usan con algún refuerzo. Asimismo tienen un procesamiento fácil y mejor impregnación en las fibras porque la resina líquida se puede manipular a temperatura ambiente en varios procesos como *filament winding*, *pultrusion* y *RTM* (20).

Las resinas termofijas ofrecen buena estabilidad eléctrica y térmica, buena rigidez, resistencia a solventes y químicos. Las resinas termofijas más usadas como matrices poliméricas en materiales compuestos son la poliéster, epóxica viniléster, fenólica, esteres cianatos, bismaldeimidadas y poliamidas.

Las resinas poliéster son resinas de bajo costo que ofrecen sistemas de alta resistencia a la corrosión, en la tabla 6 se reportan algunas propiedades de éstas.

La temperatura de operación de estas resinas son menores a las resinas epóxicas, y estas se usan en los procesos de *pultrusion, filament winding, SMC, y RTM*.

Densidad (g/cm ³)	1.1-1.4
Resistencia a tensión MPa	35-95
Modulo 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

2.6.2 Propiedades de la resina epóxica

Cuando se selecciona una resina termoestable, las propiedades que se consideran son: esfuerzo a tensión, módulo de tensión, resistencia al impacto, temperatura de transición vítrea, flamabilidad, durabilidad y servicio, disponibilidad de materiales, facilidad de procesamiento y costos (1).

Las resinas epóxicas son resinas de buena resistencia a la tenacidad y son usadas comúnmente en estructuras aeroespaciales y en algunas otras. Las resinas epóxicas tienen buena resistencia al impacto, excelentes propiedades de tenacidad, buena transferencia de carga cuando son reforzadas con fibras y por lo general son curadas en autoclave para mejorar las propiedades mecánicas (23). En la tabla 7 se presentan algunas propiedades de la resina epóxica.

Tabla 7. Propiedades de resina epóxica (1)	
Densidad (g/cm ³)	1.30
Resistencia a tensión MPa	83
Modulo de tensión GPa	4.1
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	120-180

2.6.3 Propiedades de las fibras de vidrio

Los materiales de refuerzo en los materiales compuestos son importantes constituyentes porque proveen la rigidez y resistencia al compuesto. Los refuerzos más comunes son las fibras de vidrio, carbono, aramidas y boro; en este trabajo la atención se centra en las propiedades de las fibras de vidrio y carbono. Los diámetros típicos de las fibras de vidrio varían de 5 µm a 20 µm. (20).

La fibra de vidrio se puede clasificar en dos tipos: fibras de propósito general o bajo costo y fibras de propósito especial. El 90% de las fibras utilizadas es de propósito general, estas fibras son conocidas como E-glass. En la tabla 8 se exhibe la clasificación de las fibras de vidrio que existen en el mercado, (1).

Tabla 8. Designación de las fibras de vidrio (1).	
Letra designada	Propiedad o característica
E, Electric	Baja conductividad eléctrica
S, Strength	Alta resistencia
C, Chemical	Alta durabilidad química
M, Modulus	Alta rigidez
A, Alkali	Alto contenido de vidrio
D, Dielectric	Constante dieléctrica baja

En la tabla 9 se exponen las principales propiedades de la fibra de vidrio, del acero y del aluminio.

Tabla 9. Propiedades fibra de vidrio (20).

Material	Diámetro (μm)	Densidad (ρ) (g/cm ³)	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
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

2.6.4 Propiedades de las fibras de carbono

Los compuestos hechos con fibra de carbono son cinco veces más fuertes que el acero 1020 para partes estructurales, y cinco veces más ligeros. En comparación con el aluminio, los compuestos elaborados con fibra de carbono son siete veces más resistentes y dos veces más livianos. Estos compuestos tienen propiedades de fatiga superiores a todos los metales que se conocen y cuando se complementan con la resina apropiada, son uno de los materiales más resistentes a la corrosión.

En la tabla 10 se listan las principales propiedades mecánicas de las fibras de carbono, del acero y del aluminio.

Tabla 10. Propiedades de las fibras de carbono (20).

Material	Diámetro (μm)	Densidad (ρ) (g/cm ³)	Módulo tensión (E) (GPa)	Resistencia a la tensión (σ) (GPa)	Módulo específico (E/ρ)	Resistencia específica	Punto de fusión (°C)	% elongación a la fractura
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 de Al		2.7	69	0.14-0.62	26	0.05-0.23	600	8-16

2.7 Niveles de estudio de los materiales compuestos

Por lo común, se emplean dos niveles de análisis para los materiales compuestos: el micromecánico y el macromecánico, cuando se habla de micromecánico se entiende que el objetivo es analizar el comportamiento de la fibra y la resina, y cómo afecta su combinación el comportamiento del compuesto en alguna aplicación. Este tipo de análisis jugará un rol muy importante en los años siguientes para determinar el desempeño de los materiales compuestos, por otra parte, se tienen algunas limitaciones para realizar estos análisis, tales como la fidelidad de los resultados de modelos para predecir fallas, por lo que muchos de los enfoques de investigación recurren a la macromecánica de las láminas del compuesto. Conforme avanza el uso de los materiales compuestos, se van desarrollando ajustes y afinaciones micromecánicas ayudando a tener la capacidad para moldearlos y explotarlos (1).

La macromecánica usa planos o láminas como bloques de construcción para analizar el compuesto laminado. La teoría de laminación es usada para predecir con exactitud las propiedades del laminado:

1. Relación esfuerzo-deformación para esfuerzos de flexión.
2. Efectos térmicos y de humedad.
3. Comportamiento inelástico.
4. Resistencia y falla.
5. Esfuerzos interlaminares.

La interfase juega un papel crucial en los materiales compuestos. Muchos fenómenos importantes pueden ocurrir en la interfase de la matriz-refuerzo. La rigidez y la resistencia se dan en transferencias de carga a través de la interfase, la tenacidad está influenciada por la deflexión de grietas, el efecto *pull-out*, y la ductilidad es afectada por la relajación de los picos de esfuerzo cerca de la interfase. Sin embargo aún hay muchas preguntas de cómo comprender de una mejor manera las respuestas mecánicas en la interfase (24).

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras dependen de tres factores: 1) La resistencia y el módulo de la fibra 2) Resistencia y estabilidad química de la resina, 3) Efectividad del enlace entre la resina y la fibra en la transferencia de esfuerzos en la interfase. Las propiedades finales de los compuestos reforzados con fibras se alcanzan en el curado de las resinas y dependen de la calidad del molde de llenado.

Es claro que en el caso de esos compuestos no es fácil poder tener una excelente unión entre la matriz y la fibra. Así cuando se tiene una superficie de la fibra de carbono no tratada y una resina epóxica curada, presenta una baja resistencia cortante en la interfase. Con objeto de mejorar la adhesión entre la fibra y la matriz,

la fibra es tratada previamente. Los tratamientos más comunes de la fibra de carbono consisten en hacer más fuerte su superficie, añadiendo grupos de oxígenos, que incrementan la unión entre la fibra y la matriz cerca del doble que inicialmente presentaba la fibra antes del tratamiento (24).

La naturaleza del enlace no sólo depende de la disposición atómica, de la conformación molecular y de la constitución química de la fibra y de la matriz, sino también de las propiedades morfológicas de la fibra y de la difusividad de los elementos en cada constituyente. Por lo tanto, se deduce que la interfase es específica para cada sistema de fibra-matriz. La adherencia en general se puede atribuir a los mecanismos de absorción, humectación, atracción electrostática, enlace químico, enlace por reacción y la reacción de intercambio de unión (25).

2.8 Patrones y mecanismos de fractura de los materiales compuestos

La aplicación de la fractografía a la investigación de materiales compuestos es, hoy en día, diversa. En un nivel fundamental, ofrece una visión de los daños, los procesos de falla y una ruta de optimización del material. Por lo tanto proporciona un medio para validar modelos predictivos de fractura basados físicamente en criterios de falla. Hay tres modos de fallo fundamentales:

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 patrones de fractura más comúnmente observados en materiales compuestos. Las causas más frecuentes de la delaminación son los materiales utilizados y las discontinuidades estructurales que dan lugar a tensiones interlaminares.

En la figura 36 se presenta la morfología de la superficie de fractura por delaminación de un compuesto de fibra de carbono/resina epóxica en relación con la tenacidad del compuesto, en este caso la fractura se generó por tensión en modo I (26).

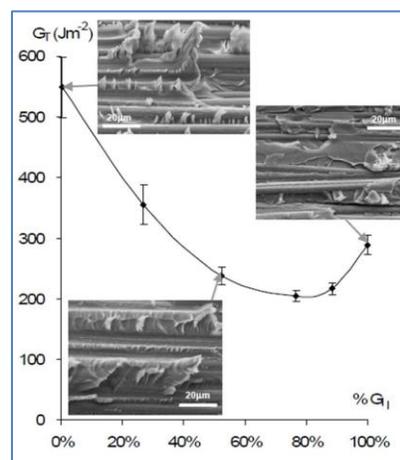


Figura 36. Tenacidad vs proporción fibra/matriz para T800/924 que muestra el cambio en la morfología de la fractura (26).

Los compuestos pueden exhibir modos de fallo ya sean relativamente simples o extremadamente complejos. Las fallas complejas pueden incluir una o más fracturas interlaminares, intralaminares, o translaminares, y por lo tanto, pueden necesitar ser examinadas muchas superficies de fractura. Para reducir el número de superficies a examinar se debe tomar la decisión de cuáles superficies son las que proporcionarían una información más útil. Esta decisión representa a menudo una de las tareas más difíciles involucradas en el análisis de fallos de materiales compuestos. En general, la selección de las superficies a estudiar, depende primero del modo de fallo predominante exhibido por el componente, y segundo de la

necesidad de examinar las fracturas secundarias con el fin de explicar la fractura primaria.

En materiales compuestos reforzados con fibras, las fallas longitudinal y transversal a la dirección de las fibras se distinguen, como en la figura 37. 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. (27).

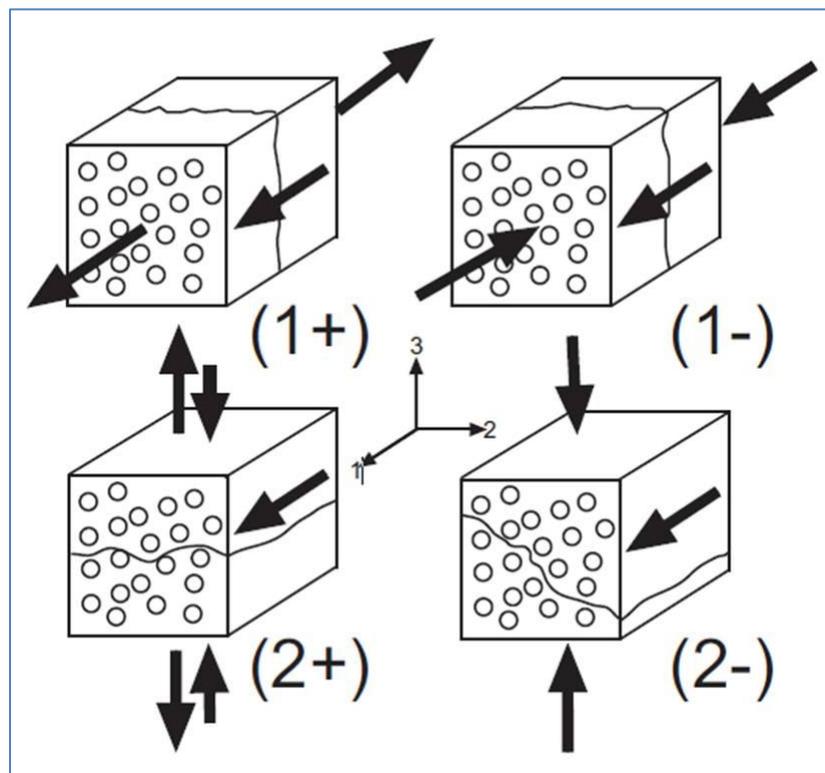


Figura 37. Modos de falla intralaminar: (1+) Tensión longitudinal. (1-) Compresión longitudinal. (2+) Fractura transversal con orientación de fibras $a_0=0^\circ$. (2-) Fractura transversal con orientación de fibras $a_0=53^\circ$ (27).

La falla longitudinal ocurre en el modo de tensión (+1) en la figura 37, 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 37. 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 37. Sin embargo, el aumento de la tensión transversal a la compresión provoca un cambio en el ángulo del plano de fractura (-2) (27).

En general, la fractografía se utiliza para determinar el modo de fallo, sitio de iniciación, dirección y crecimiento de la grieta, y todas las influencias ambientales sobre la falla. 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 38a, las fibras individuales presentan fracturas radiales en los extremos de las fibras y, a menudo exhiben morfología de “mirror o espejo”, “mist ó niebla” y “hackles ó superficie fibrosa”, lo que proporciona un medio para deducir la dirección local y global de la falla. La fractura en la compresión (fig. 38b) es por lo general a través de microbuckling, lo que conduce a “chop marks” sobre un lado de los extremos de las fibras fracturadas y los patrones radiales en la otra (26).

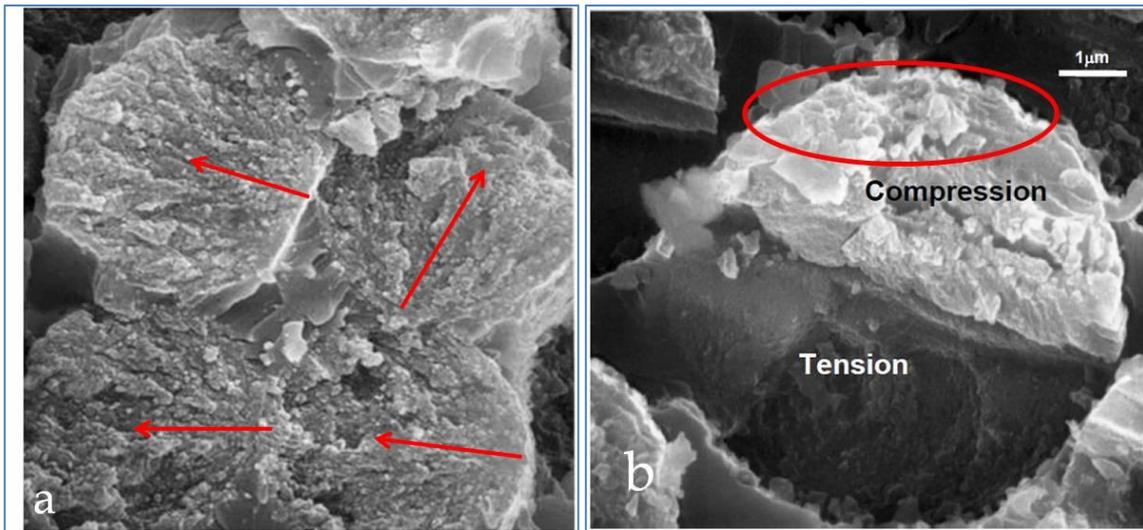


Figura 38. Figura 38a, morfología de fractura de las fibras en tensión y figura 38b morfología de compresión en CFRP (carbon fiber reinforced polymers) (26).

La figura 39 muestra una probeta de fibra de carbono fracturada en modo de tensión, la superficie aparentemente es rugosa y se pueden apreciar líneas de Chevron.

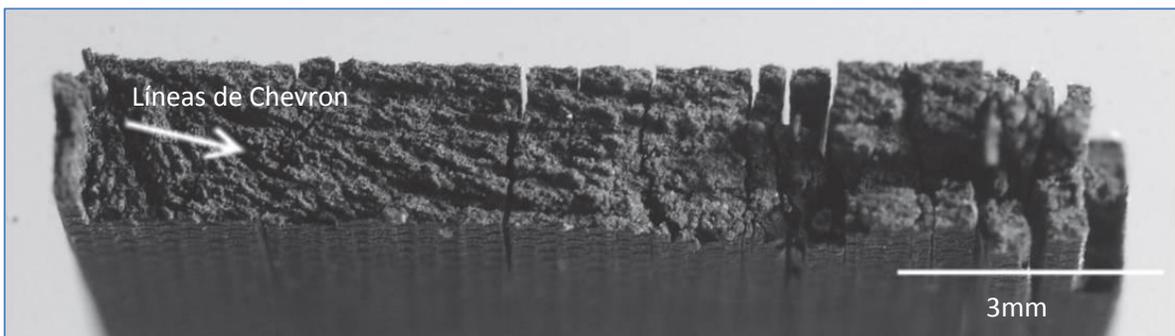


Figura 39. Probeta de compuesto reforzada con fibra de carbono fracturada en modo de tensión. (28).

2.9 Modelos de análisis de mecánica de la fractura en materiales compuestos

Los modelos numéricos y analíticos de los materiales y estructuras han alcanzado un nivel sin precedentes de precisión y sofisticación, de tal manera que los ingenieros tienen un formidable conjunto de herramientas a su disposición para desarrollar innovadores y eficientes diseños estructurales. Sin embargo, las herramientas para materiales compuestos poliméricos son menos maduras, su desarrollo se esfuerza por mantener el ritmo con los rápidos avances en materiales compuestos, como las nuevas rutas de procesamiento, arquitecturas, tipos de constituyentes, aplicaciones y los controladores para el diseño (26).

A través del tiempo se han desarrollado modelos y teorías para la investigación de la fractura, propagación y nucleación de grietas. Uno de los más importantes modelos físicos es el FBM (Fiber Bundle Model) introducido por Peires en 1927 para entender la fuerza de hilados de algodón. Daniels aportó una formulación de la probabilística del sonido en el modelo. El FBM ha sido usado para describir la degradación y fractura de los materiales, sin embargo, debido a su simplicidad, durante los últimos años también sirve como un modelo general de la ruptura de una amplia clase de sistemas desordenados de muchos elementos que interactúan sujetos a diversos tipos de cargas externas (29).

La construcción de modelo FBM se basa en los siguientes supuestos: discretización, *failure law*, regla de la carga cortante, distribución de las fallas de umbrales, dependencia del tiempo. Para los materiales compuestos se han realizado trabajos usando este modelo tal como lo cita R. C. Hidalgo y colaboradores (30). Así se ha estudiado el efecto de las heterogeneidades en la fractura de materiales desordenados, analizando la respuesta macroscópica demostraron que la transición de carga fibra-matriz está condicionada por la distribución de desorden donde la curva constitutiva tiene un punto máximo de inflexión definiendo un fenómeno nuevo de ruptura.

Los avances en el Análisis de Elementos Finitos (FEA) no lineal basada en métodos de software y, sobre todo, la introducción de múltiples escalas, herramientas de análisis de compuestos específicos han llevado a un crecimiento dramático en la simulación FE basada en parte en el comportamiento en servicio - pruebas virtuales - que pueden aumentar y, en muchos casos, compensar las pruebas físicas, reduciendo el tiempo y costo de desarrollo.

Un test virtual describe generalmente la capacidad de proporcionar la simulación de predicción del comportamiento de la estructura física del mundo real. Se espera que la predicción proporcione el valor de resistencia de la estructura con el fin de garantizar un dimensionamiento adecuado contra condiciones de servicio. También debe demostrar la capacidad para describir los efectos en profundidades locales, daños materiales progresivos hasta la falla del material localizado, y todos los efectos consecuentes hasta el colapso de la estructura definitiva (31).

Los ingenieros utilizan el análisis de elementos finitos (FEA) para predecir el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones de carga. El analista establece el problema mediante la definición de geometría de la pieza, las propiedades del material, cargas y condiciones de modelo. Los modelos en compuestos se basan normalmente en la teoría de placas laminadas. Esta teoría proporciona una predicción precisa de tensiones y deformaciones de capas asumiendo, por supuesto, que los valores introducidos del material y de la carga son razonablemente precisos. La teoría más práctica, la deformación máxima (o estrés), simplemente afirma que una capa falla cuando el componente (o el estrés) excede un cierto nivel, determinado empíricamente. Otra teoría popular, Tsai-Wu o criterio cuadrático, también se basa en los niveles de estrés empíricos, para dar cuenta de la interacción entre los diferentes componentes de tensión y deformación (32).

Capítulo 3. Motivación, hipótesis y objetivos

3.1 Motivación

En la introducción del presente trabajo se describió brevemente el nivel de estudio de los materiales compuestos, se mencionó que en los metales, cerámicos y en las últimas décadas en los polímeros se tiene una mejor comprensión de las características, desempeño y propiedades de estos materiales. La principal motivación de este proyecto es contribuir a incrementar el conocimiento que se tiene actualmente en el país acerca de los patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos. Como se discutió en la introducción se cree que este trabajo aportará conocimientos que pudieran impactar no sólo en la industria aeroespacial, sino también en otras industrias donde se utilizan estos materiales. Estos sectores se encuentran estrechamente vinculados a la continua innovación y al desarrollo de nuevas tecnologías y materiales de vanguardia, contribuyendo de manera relevante en el desarrollo económico y social de los países con alta participación.

3.2 Hipótesis

El estudio comparativo de los patrones y mecanismos de fractura en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras en relación con fracturas ya estudiadas de metales, cerámicos y polímeros, permitirá una mejor comprensión de los patrones y mecanismos dominantes en la fractura de estos materiales.

3.3 Objetivo general

Desarrollar capacidades para comprender los aspectos físicos en los mecanismos de nucleación y propagación de grietas en materiales compuestos reforzados con fibras mediante el estudio documental y experimental de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono.

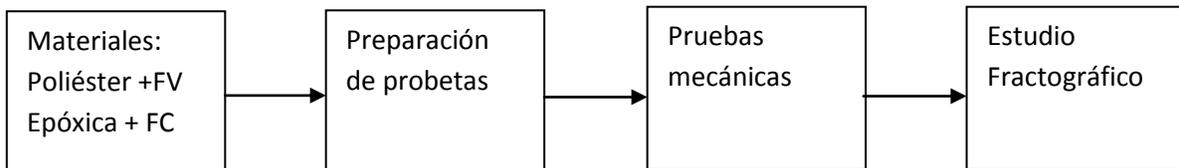
3.4 Objetivos específicos

1. Identificar los patrones de fractura en probetas de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio y de carbono ensayadas en flexión.
2. Relacionar los patrones observados con los probables mecanismos de nucleación y propagación de grietas, a la luz del estado del arte.
3. Proponer modelos que incluyan la secuencia de eventos que tiendan a explicar la generación de los patrones de fractura observados.

Capítulo 4. Experimentación

En el presente trabajo se usaron la resina epóxica y la resina poliéster como matrices y fibras de vidrio y de carbono como refuerzos.

Procedimiento de experimentación:



FV: Fibra de vidrio FC: Fibra de carbono

4.1 Materiales

4.1.1 Resina poliéster

La resina poliéster PP-250 se usa en procesos de laminación desarrollados mediante los métodos de moldeo por aspersión ó de moldeo manual. Esta resina se diseña para cubrir las necesidades de los fabricantes de artículos de plástico reforzado con fibra de vidrio para aplicaciones en las industrias automotriz, marina, de construcción y artesanal.

Las principales características de la resina poliéster PP-250 son: excelente humectación, buena tixotropía que evita escurrimiento, bajo nivel de contracción, buen curado aún en secciones delgadas, rápido desarrollo de dureza que permite el recorte de las orillas en tiempos óptimos. En la tabla 11 se reportan algunas propiedades de la resina en estado líquido, antes de utilizarla como matriz en un compuesto elaborado.

Tabla 11. Propiedades de resina líquida (33)	
Especificación	Valor
Viscosidad @ 25° C, Brookfield LVF, aguja # 3 a 60 r.p.m. (cps)	450
Densidad @ 25 ° C (g/ ml)	1.08
Color	Azul/verde
% de sólidos	61

La tabla 12 muestra las propiedades mecánicas de la resina poliéster.

Tabla 12. Propiedades mecánicas de resina poliéster (33)	
Especificación	Encapsulado
Resistencia a la tensión, MPa	58.60
Módulo de elasticidad en tensión, GPa	3.79
Tensión % de elongación	2
Resistencia a la flexión, MPa	93.76
Dureza Barcol	40
Temperatura de transición vítrea Tg (°C)	80-100

4.1.2 Resina epóxica

Las resinas epóxicas, tal como se describió en el capítulo 2, presentan mejores propiedades mecánicas que las de poliéster, su temperatura de transición vítrea es mayor que las de resina poliéster, este tipo de resina es más usada para aplicaciones muy específicas, en este trabajo se usó la resina epóxica Hexply M21 (23).

En la tabla 13 se presentan algunas propiedades de esta resina que se usó como matriz para las fibras de vidrio y de carbono.

Tabla 13. Propiedades de resina epóxica (1)	
Densidad (g/cm ³)	1.30
Resistencia a tensión, MPa	83
Módulo de , GPa	4.1
Temperatura de transición vítrea, Tg (°C)	120-180

4.1.3 Fibras de vidrio

Para este trabajo se utilizó la fibra de vidrio tipo E, (baja conductividad eléctrica), que está diseñada para usarse frecuentemente en sistema de resinas poliéster y viniléster, es ideal para aplicaciones de moldeo abierto, como soporte de Gel Coat y como refuerzos para laminados estándar. Dentro de sus características está: multicompatibilidad, rápida impregnación, uniformidad de espesor, alta resistencia a la tensión, bajo nivel de fibra suelta.

4.1.4 Fibras de carbono

Para este trabajo las fibras de carbono se emplearon fibras de carbono (Hexcel T700) pre-impregnadas en rollo teniendo un tejido en una sola dirección, en la tabla 14 se citan algunas propiedades de la fibra de carbono. (34). Las propiedades de las fibras de vidrio y carbono se tienen en las tablas 7 y 8 del capítulo 2.

Tabla 14. Propiedades de la fibra de carbono (35).	
Densidad (g/cm ³)	1.8
Resistencia a tensión, MPa	4900
Módulo de tensión, GPa	230

4.2 Preparación de las probetas

Una vez teniendo los materiales disponibles se prepararon las probetas tal como se describe a continuación:

1. Elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo para fracturarlas en tensión.
2. Elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo para fracturarlas en flexión.
3. Elaboración de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio para fracturarlas en flexión.
4. Elaboración de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio para fracturarlas en flexión.
5. Elaboración de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono para fracturarlas en flexión.

4.2.1 Preparación de probetas de resina poliéster sin refuerzos para la generación de fracturas en tensión

Para la elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo para la generación de fracturas en tensión, se fabricó un molde de caucho-silicona con las dimensiones que marca la norma ASTM D3039, tal como lo muestra la figura 40.

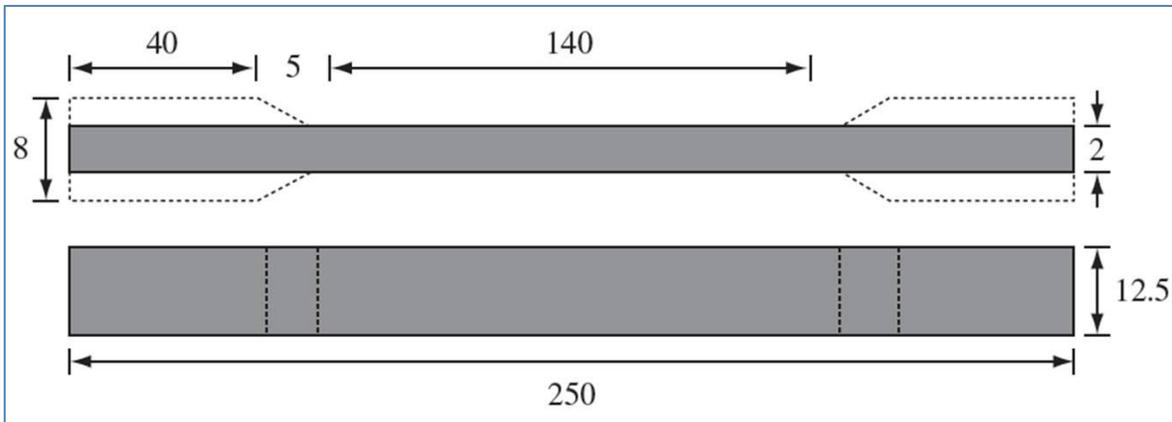


Figura 40. Norma ASTM D3039 para fabricación de probetas en tensión. Dimensiones en mm (36).

Para la elaboración de las probetas de resina poliéster sin refuerzos en tensión, se vertió la resina en un vaso, posteriormente el vaso se colocó en una báscula para determinar su peso, después se le agregó un 3.5% en peso de catalizador para que comenzara a curar, ya que se tenía la resina preparada se vaciaba ésta en el molde de caucho silicona previamente elaborado bajo la norma ASTM D3039 (figura 41). Después se dejaba la resina entre 15 y 25 minutos para que concluyera el curado y luego se procedía a retirar del molde las probetas ya listas, para generar entonces las fracturas en tensión (figura 42).

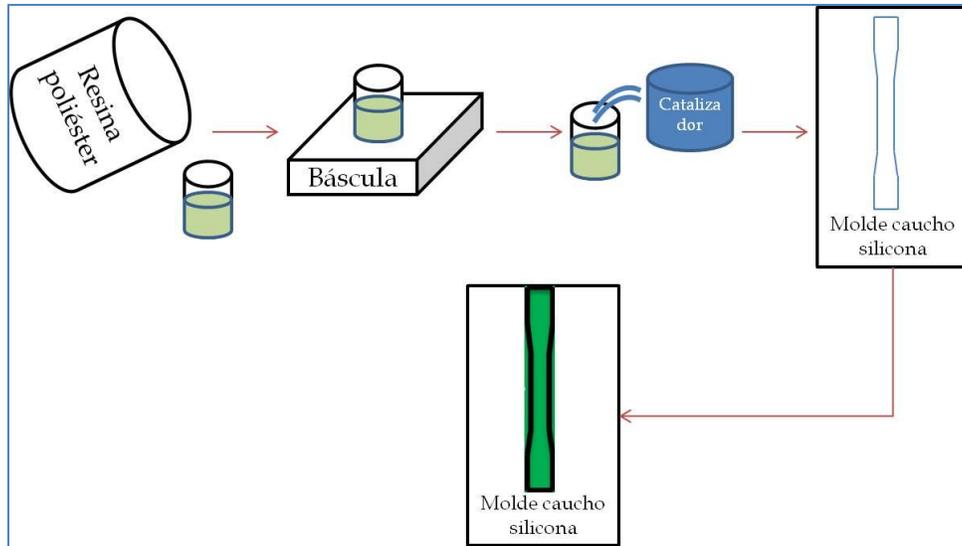


Figura 41. Procedimiento para la elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo.



Figura 42. Probetas de resina poliéster sin refuerzo para ser fracturadas en tensión.

4.2.2 Preparación de probetas de resina poliéster sin refuerzos para la generación de fracturas en flexión

Para la elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo en flexión, se usó la norma ASTM D 790 tal como se representa en la figura 43.

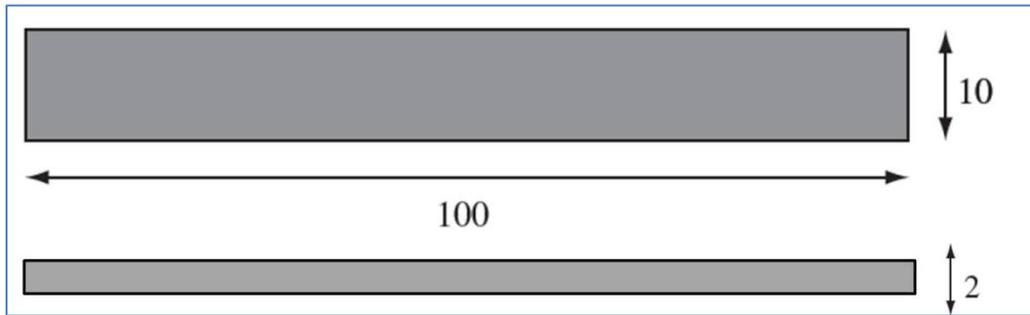


Figura 43. Norma ASTM D 790 para fabricación de probetas en flexión. Dimensiones en mm (36).

Para la elaboración de las probetas de resina poliéster sin refuerzo en flexión se utilizó el mismo procedimiento de preparación que las probetas de resina poliéster sin refuerzo, con la diferencia de que para esta preparación no se vaciaron en moldes de caucho-silicona. La figura 44 muestra el procedimiento que se siguió una vez preparada la resina con el catalizador. Primero se aplicaron capas de cera desmoldante sobre una superficie de vidrio para que cuando seicara no se quedara adherida la placa del compuesto a la superficie de la placa de vidrio que se utilizó como molde, posteriormente el área del vidrio se dividió en secciones utilizando plastilina moldeadora para formar las dimensiones de la probeta que marcaba la norma ASTM D 790, una vez que se tenía el vidrio con las divisiones se vaciaba la resina dentro de los espacios creados, se esperaba de 15 a 25 minutos para que la resina endureciera y se retiraban las probetas de la superficie del vidrio.

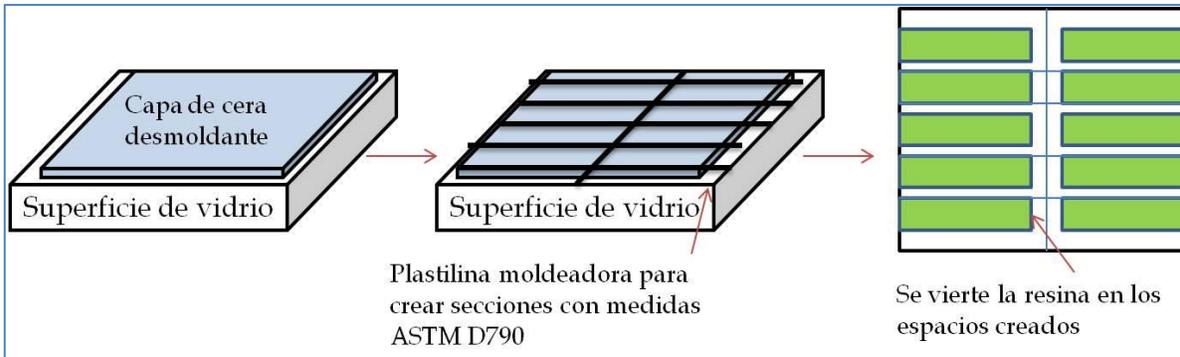


Figura 44. Procedimiento para la elaboración de probetas de resina poliéster sin refuerzo.



Figura 45. Probetas de resina poliéster sin refuerzo para ser fracturadas en flexión.

4.2.3 Preparación de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio para la generación de fracturas en flexión

Para la elaboración de las probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio, se recortaron cuatro cuadros o capas de fibra de vidrio de 25 x 25 cm aproximadamente, con dirección aleatoria, figura 46. Posteriormente las cuatro capas se pesaron en la báscula, esto para determinar que dicho peso fuera el 30% del compuesto a elaborar, obteniendo el peso de las fibras se definía la cantidad de resina poliéster a utilizar, el 70% restante del compuesto final. La figura 47a muestra un ejemplo para la obtención de las cantidades. Una vez que se tenía la cantidad de resina a utilizar, se preparaba la resina poliéster igual que en el anterior proceso. Ya que se contaba con las cuatro capas de fibra de vidrio y la resina preparada, se vaciaba una capa de resina con la ayuda de un rodillo para cubrir toda la superficie del vidrio, después sobre la capa de resina se aplicaba una capa de fibra de vidrio ejerciendo presión con el rodillo para expandir la resina y asegurar que la resina impregnara la capa de fibra de vidrio y así sucesivamente hasta consumir toda la resina y cubrir las cuatro capas de fibra de vidrio (figura 47b). El molde de vidrio previamente se recubrió con cera para que cuando se secase la placa del compuesto no se quedara adherida a la superficie del molde de vidrio.

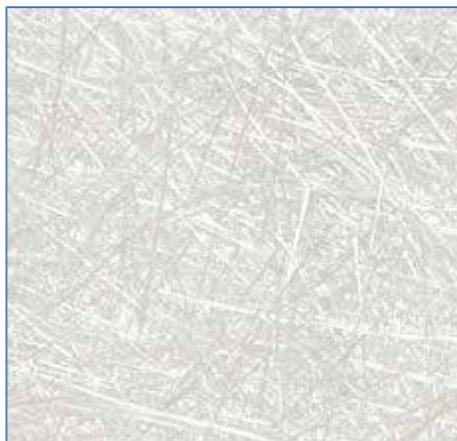


Figura 46. Fibra de vidrio con orientación aleatoria.

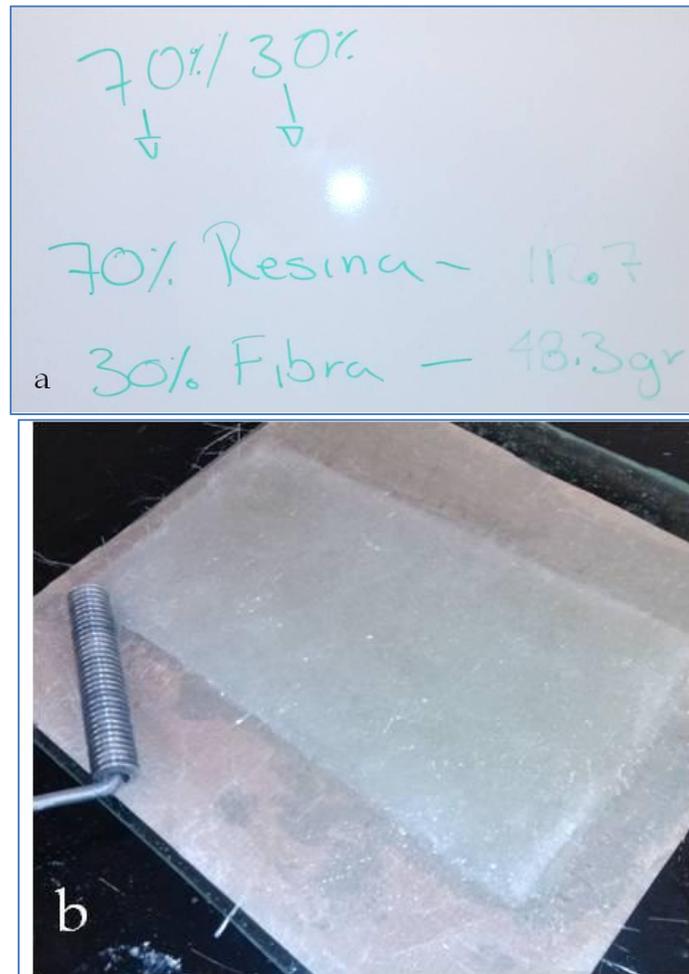


Figura 47. Figura 47a. Ejemplo para la obtención de cantidades de resina y fibra de vidrio, 70% y 30% respectivamente. Figura 45b. Proceso para la fabricación de resina reforzada con fibra de vidrio

Una vez terminado el proceso, se dejaba curar el compuesto final durante 24 horas, posteriormente se quitaba el compuesto para trazar las mediciones que marca la norma D790, finalmente se cortaban para que quedaran listas para ser fracturadas en flexión (figura 48).



Figura 48. Probetas de resina poliéster preparadas para fracturarlas en flexión.

4.2.4 Preparación de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio para la generación de fracturas en flexión

Para la elaboración de las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio, se utilizó el mismo procedimiento que para las probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio, la única diferencia es el porcentaje de endurecedor utilizado, en este caso se usó un 12% en peso para la resina. A excepción de esto, el molde, los porcentajes de resina-matriz, el método de elaboración, las norma ASTM y la manera de cortarlas fueron las mismas. La figura 49 muestra las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio.

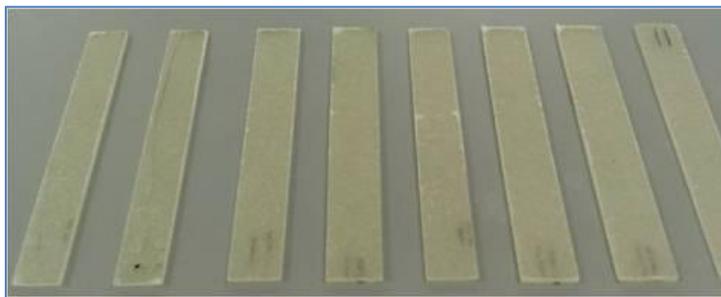


Figura 49. Probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio, preparadas para ser fracturadas en flexión.

4.2.5 Preparación de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono para la generación de fractura en flexión

La elaboración de las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de carbono fue como la describe Elizondo (34), (tesis de maestría en proceso): Primero se colocó una tela de arranque para evitar el contacto de las telas y tejidos con el material a diseñar, enseguida se puso un papel perforado que permitía el paso del exceso de la resina proveniente de las fibras de carbono pre-impregnadas. Después se colocaba un tejido de drenaje para retener el exceso de resina proveniente del laminado conformado por las fibras de carbono. Posteriormente se ponía un papel micro-perforado que extraía el aire del interior del empaque de la pieza y evitaba el paso de la resina hacia la bomba de vacío. Por último, se colocaba una bolsa de vacío para la extracción total del aire del material buscando evitar la porosidad del material al momento de ser curado.

Para realizar el curado del material, se necesitaba realizar una prueba de vacío antes de dicho proceso, para poder así cerciorarse que el vacío dentro de la bolsa estuviera perfecto y evitar así posibles fugas dentro del horno que pudieran ocasionar un material poroso.

Una vez que se tenía el compuesto se introducía dentro de un horno electrónico convencional, el cual tiene una temperatura máxima de operación de 180°C con una presión interior de 1 bar dada por la bomba de vacío para su proceso de curado, el proceso a realizar comenzaba a una temperatura ambiente (25°C) con un incremento continuo de 2°C/min hasta que se llegaba a la temperatura máxima de 180°C, manteniéndolo así durante dos horas para la realización de la polimerización correspondiente. Realizado el curado, se llevaba a cabo el proceso de enfriamiento controlado en el mismo horno electrónico hasta que se llegaba a la temperatura ambiente, por último la pieza reposaba por un mínimo de 24 horas.

4.3 Generación de fracturas

4.3.1 Generación de fracturas en tensión a probetas de resina poliéster sin refuerzo

Una vez elaboradas las probetas de resina poliéster sin refuerzo, se utilizó una máquina universal de pruebas mecánicas, las muestras se deformaron a una velocidad de 50 mm/min. La figura 50 muestra una gráfica de esfuerzo-deformación de este tipo de probetas, cabe mencionar que en las fracturas que se hicieron los valores de esfuerzo se encontraban entre 30 y 42 MPa.

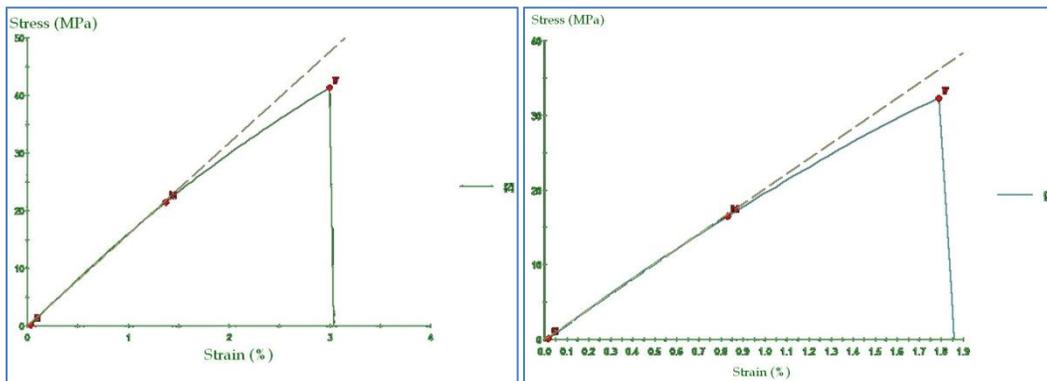


Figura 50. Gráficas de resultados de probetas de resina poliéster sin refuerzo fracturadas en tensión.

4.3.2 Generación de fracturas en flexión a probetas de resina poliéster sin refuerzo

La generación de fracturas en flexión para las probetas de resina poliéster sin refuerzo se efectuó en tres puntos tal y como lo muestra la figura 51.

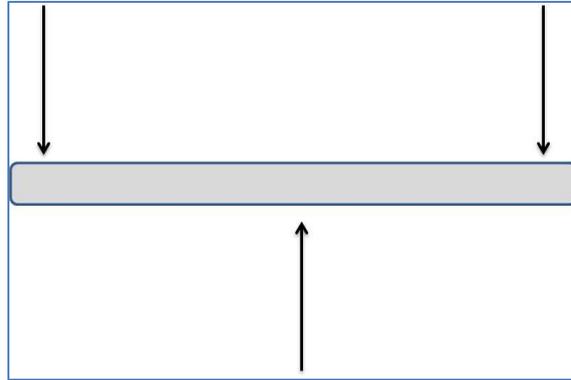


Figura 51. Generación de fracturas en flexión para las probetas de resina poliéster sin refuerzos.

4.3.3 Generación de fracturas en flexión a probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio

Para la generación de fracturas en flexión de las probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio, se utilizó una maquina universal de pruebas mecánicas, todas las muestras se deformaron a una velocidad de 10 mm/min.

Figura 52.



Figura 52. Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión.

4.3.4 Generación de fracturas en flexión a probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio y a probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de carbono

La generación de fracturas en flexión para las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio y fibra de carbono, se efectuó en tres puntos tal y como lo ilustra la figura 51. Las figuras 53a y 53b, son probetas fracturadas en flexión.



Figura 53a



Figura 53b.

Figura 53a. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión. Figura 53b. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturada en flexión.

Ya que se tenían las probetas fracturadas, se obtenían las secciones de fractura de cada probeta, posteriormente se recubrían con oro para ser examinadas en el MEB, figura 54.

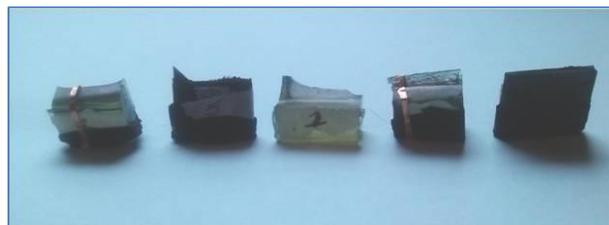


Figura 54. Probetas preparadas para ser examinadas por MEB, para la determinación de las imágenes.

Capítulo 5. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las probetas fracturadas en tensión y flexión. Para obtener las imágenes se usó la microscopía electrónica de barrido MEB mediante electrones secundarios, posteriormente se realizó el análisis fractográfico para la discusión de los patrones y mecanismos de fractura presentes en las probetas. Los resultados se comentan en el siguiente orden:

1. Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en tensión.
2. Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en flexión.
3. Resultados y discusión de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión.
4. Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión.
5. Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturadas en flexión.

5.1 Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en tensión

Las probetas de resina poliéster sin refuerzo sometidas a ensayo de tensión, fueron fracturadas en una máquina universal de pruebas mecánicas, a una velocidad de deformación de 50 mm/min. Tal como se ve en la figura 55a, a baja magnificación se observa una fractura con un patrón radial, la flecha en color rojo indica el probable origen de la fractura, pues ahí se generó un frente de grieta que al avanzar dio origen a una zona de apariencia lisa, al acelerar la grieta se ramificó dando origen a una topografía más rugosa. Las figura 55b y 55c muestran la morfología en las zonas más rugosas que resultan de una propagación relativamente rápida de el o los frentes de grieta. El patrón general puede entonces describirse como análogo al descrito como zonas “mirror”, “mist” y “hackle” (zonas especular, difusa y fibrosa), patrón característico en materiales frágiles como el vidrio.

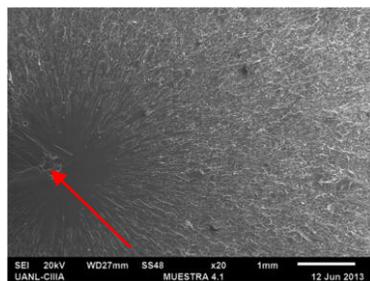


Figura 55a

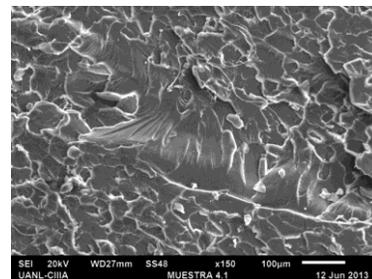


Figura 55b

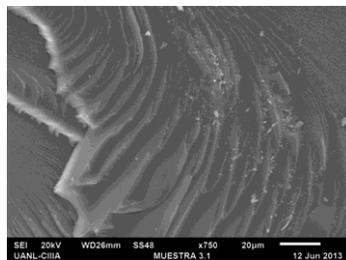


Figura 55c

Figura 55a. Probeta de resina poliéster fracturada en tensión, a una magnificación de 20x. Figura 55b. Probeta de resina poliéster fracturada en tensión, a una magnificación de 150x. Figura 55c. Probeta de resina poliéster fracturada en tensión, a una magnificación de 750x.

5.2 Resultados y discusión de probetas de resina poliéster sin refuerzos fracturadas en flexión

Las probetas de resina poliéster fracturadas en modo de flexión y preparadas con 3.5% en peso de catalizador presentaron la propagación de una grieta, la fractura se originó en el borde superior derecho de la probeta, propagándose tal como lo indica la flecha en color rojo en la figura 56a. Las figuras 56b y 56c presentan un patrón de fractura llamado “tearing” o lagrimeo generado por un deslizamiento superficial por la liberación de energía cuando la probeta está bajo flexión.

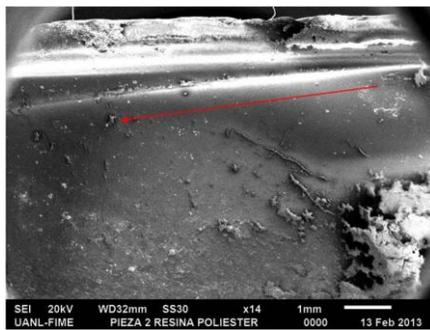


Figura 56a

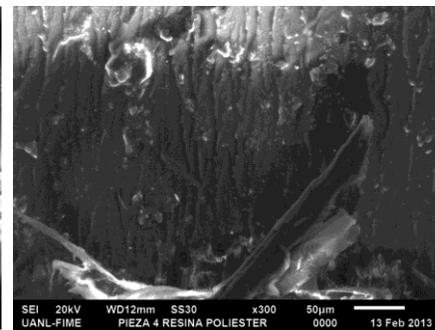


Figura 56b

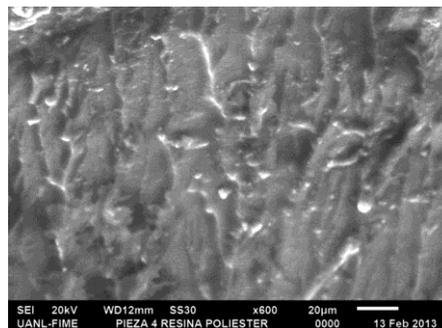


Figura 56c

Figura 56a. Probeta de resina poliéster sin refuerzo fracturada en flexión, a una magnificación de 14x. Figura 56b. Probeta de resina poliéster sin refuerzo fracturada en flexión a una magnificación de 300x. Figura 56c. Probeta de resina poliéster sin refuerzo fracturada en flexión a una magnificación de 600x.

5.3 Resultados y discusión de probetas de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión

En cuanto a las probetas de resina poliéster reforzadas con 30% de fibras de vidrio fracturadas en flexión y a una velocidad de deformación de 10 mm/min, el análisis fractográfico reveló un patrón que sugería la acción de múltiples frentes de grieta, como puede observarse en la figura 57. La propagación se da a lo largo de la probeta tal como lo indican las flechas en color rojo, el recuadro sugiere también la activación de un mecanismo de fractura que se puede apreciar como una separación considerable entre las fibras y la resina.

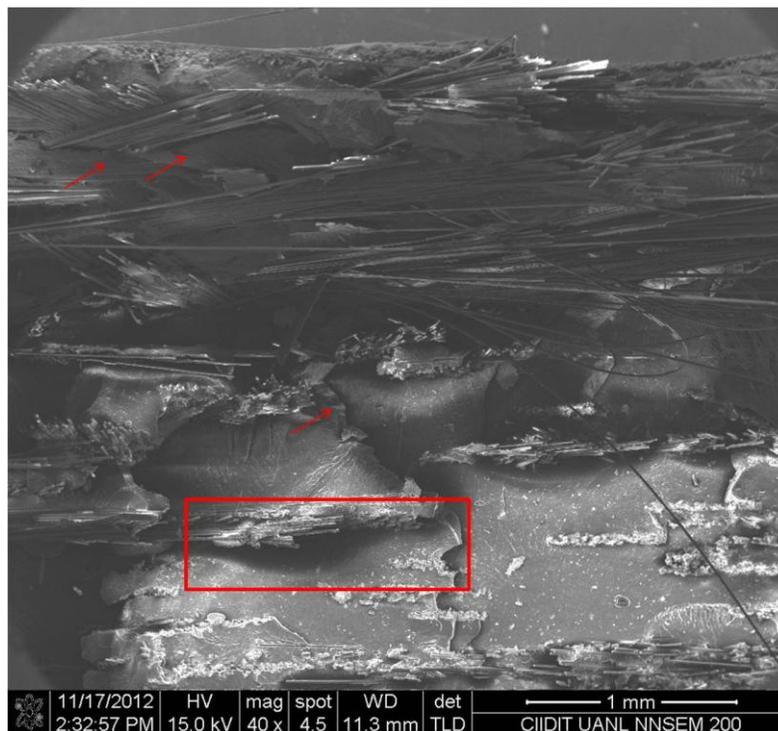


Figura 57. Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 40x.

En la figura 58 se observa un patrón de fractura en las fibras, este patrón es conocido como “*microbuckling*” (36) ocasionado por los esfuerzos que se generan en flexión (36)

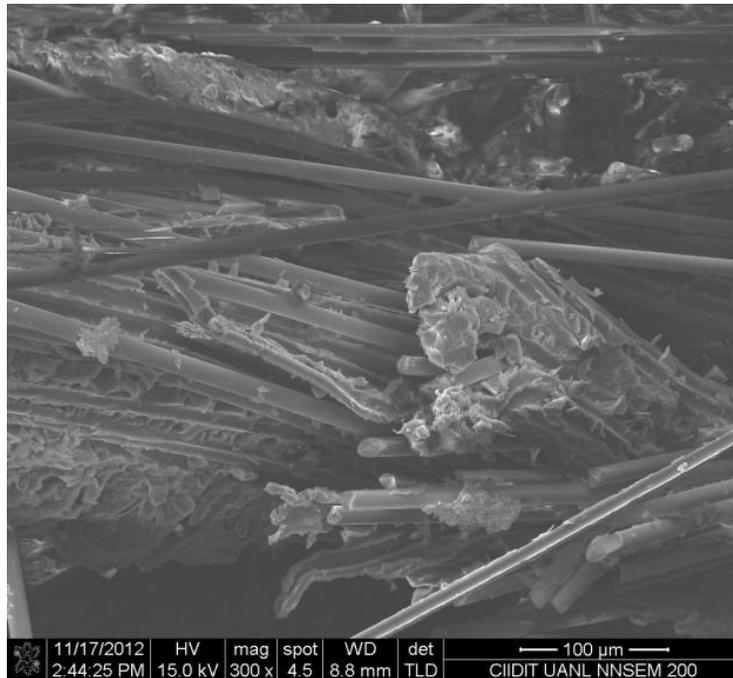


Figura 58. Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 300x.

En la figura 59 se puede apreciar una compleja superficie de fractura que involucra capas de resina y capas de haces de fibras direccionadas. Las flechas en color rojo indican regiones donde el patrón que se observa sugiere la acción de un mecanismo de fractura conocido como “*debonding*”, 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.

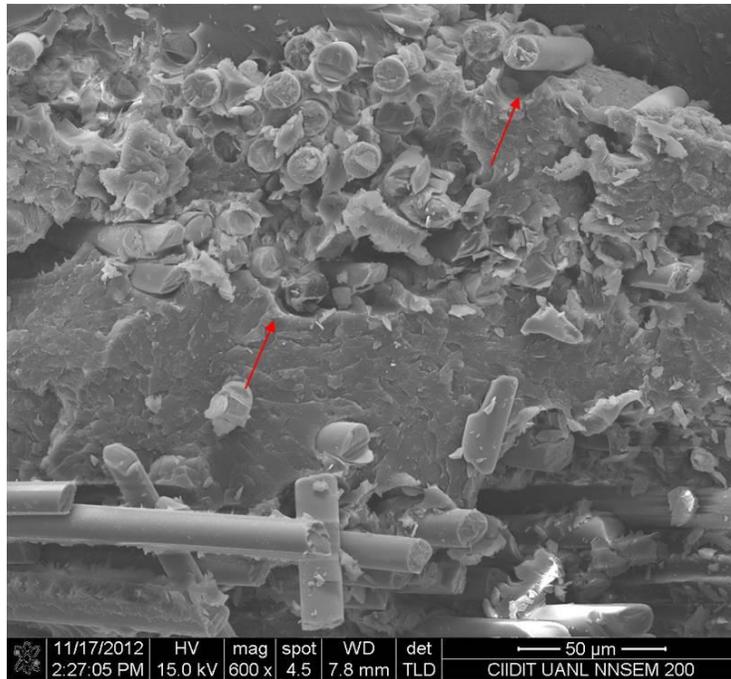


Figura 59. Probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 600x.

En la figura 60a se puede observar la fractura por flexión de una fibra de vidrio que actuaba como refuerzo en la resina poliéster. La fibra presenta dos patrones de fractura diferentes, esto es a causa del modo de fractura, en la parte inferior de la imagen se tiene una flecha en color rojo que marca el origen de la fractura en la fibra, se observa además un patrón semejante a las líneas de Chevron (37), que es un patrón detectado en otros materiales (37), así mismo, en la parte superior de la fibra, se aprecian marcas de río. La figura 60b corresponde también a una probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, los patrones de fractura son similares a los de la figura 60a, la flecha en color rojo indica el probable origen de la fractura en la fibra propagándose hacia la parte inferior.

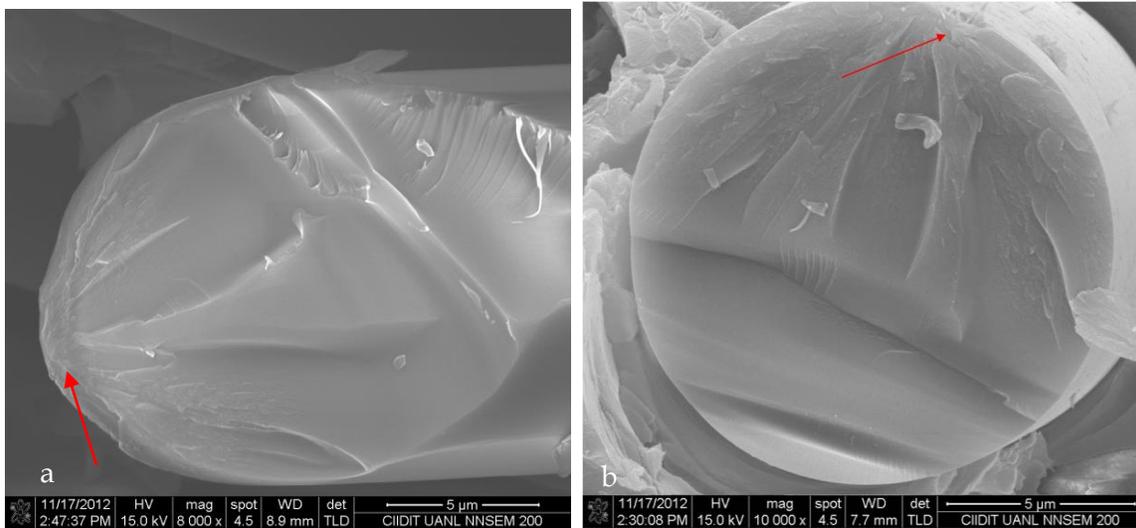


Figura 60a. Imagen de una fibra de la probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 8000x. Figura 60b. Imagen de una fibra de la probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 10000x.

5.4 Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturadas en flexión

Las probetas de resina epóxica reforzadas con fibras de vidrio fracturadas en modo de flexión basados en la norma ASTM D790 presentan complejos patrones de fractura a nivel macroscópico, así como distintos patrones y mecanismos de fractura a nivel local. En la figura 61 se aprecian fracturas en la resina a lo largo de la probeta tal y como lo marcan los recuadros rojos, también se observa claramente las capas de resina y fibra intercaladas entre sí. Este mismo mecanismo de fractura se presentó en la figura 57 una probeta de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio.

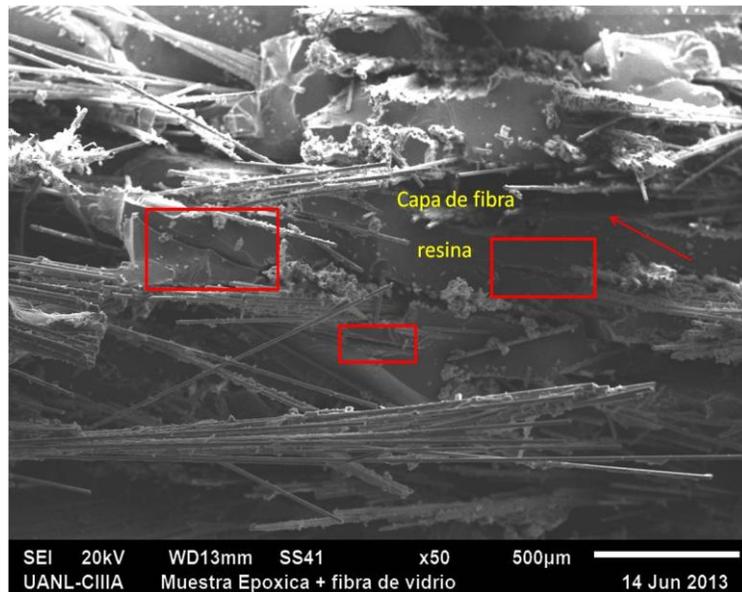


Figura 61. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 50x.

La figura 62 es una probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, se observa cómo las fibras contienen resina adherida a sus superficies tal como la marca la flecha en color rojo, señal de una adherencia considerablemente buena, cabe mencionar que en la imagen también se observan fibras que no presentan resina adherida a la superficie de la fibra como lo marca la flecha en color amarillo, de igual manera se desprenden de la matriz, pero se asume que en este caso existió una mejor adhesión.

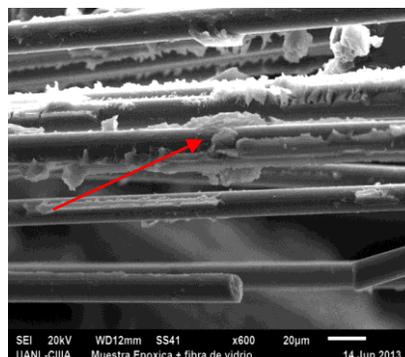


Figura 62. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en modo de flexión, a una magnificación de 600x.

Anteriormente se habló acerca del debonding, que 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 (38).

La figura 63a muestra un ejemplo de delaminación observado en la probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, se sugiere este patrón como una separación entre las capas que conforman el compuesto (39), no se aprecia la fibra de vidrio, solamente se puede observar el espacio que ocupaba antes de desprenderse de la resina lo que se permite asumir una mala adhesión entre la fibra y la resina.

La figura 63b es una imagen de probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, se pueden observar superficies de fractura provocados por el o los frentes de grieta que se propagan a través de la probeta, se considera que la fractura ocurrió específicamente en las fibras, es claro que la adhesión entre la fibra y la resina es buena, el mecanismo de fractura en este caso no fue debonding, sino la ruptura de las fibras debido a la transferencia de carga de la resina hacia la fibra actuando en toda la probeta.

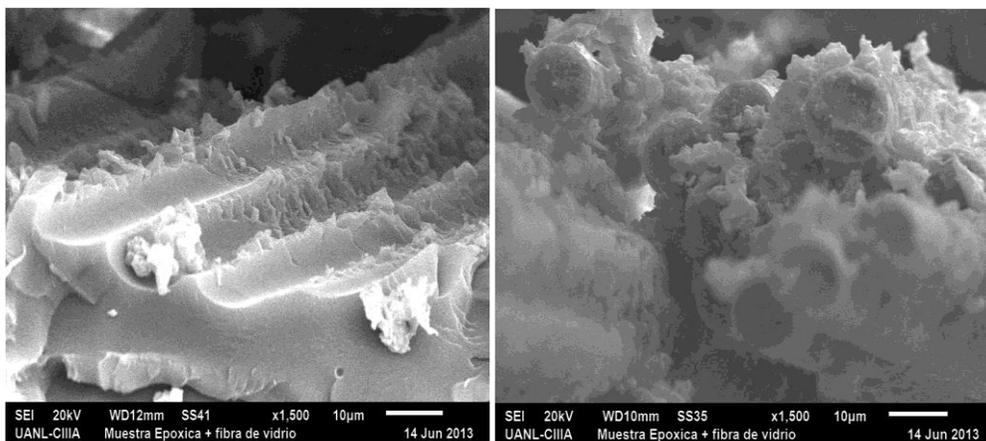


Figura 63a

Figura 63b

Figura 63a. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 1500x. Figura 63b. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 1500x.

En la figura 64 se presenta una imagen de la fibra de una probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, en ésta se observa el posible origen de la grieta, y con una flecha roja, se indica la dirección de la fractura, se asume que el patrón de fractura predominante es una fractura radial en las fibras, en la figura también se puede observar defectos en la superficie de la fibra, siendo este factor predominante para la buena adhesión en la interfase, tal como lo describe Ruchevskis S. y coautores (40).

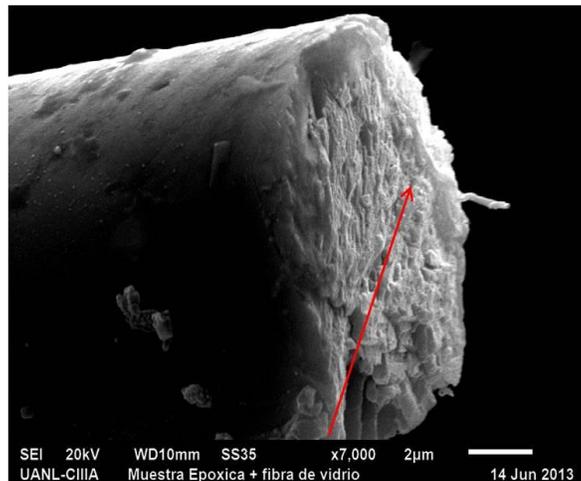


Figura 64. Imagen de una fibra de la probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 7000x.

En la fibra fracturada, que se muestra en la figura 65, se indica con una flecha roja la dirección de propagación del frente de grieta; también se observa en la superficie de fractura una morfología de apariencia predominantemente rugosa, y si bien inicialmente ésta era lisa, se daba al finalizar la fibra un incremento en la rugosidad. Esa morfología se genera porque al propagarse la grieta principal debido a la carga se disipa o libera energía en una forma proporcional a la rapidez local del frente de grieta.

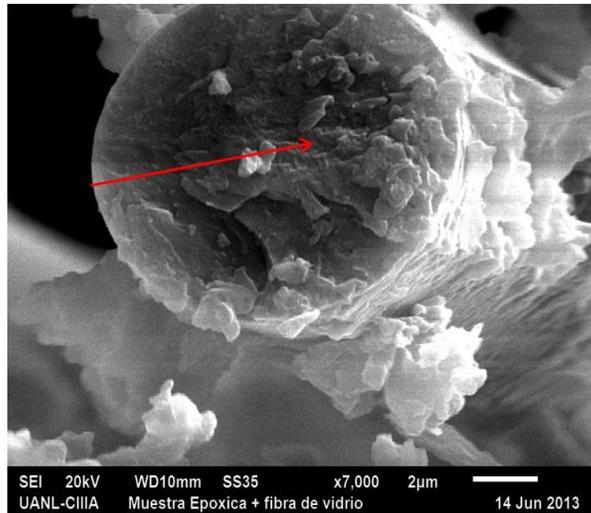


Figura 65. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio fracturada en flexión, a una magnificación de 7000x.

5.5 Resultados y discusión de probetas de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturadas en flexión

En la figura 66 se presenta una probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturada en flexión, dentro del complejo patrón de fractura se aprecia el origen de dos diferentes superficies de fractura generadas por la flexión, los recuadros en color rojo indican una superficie característica de esfuerzos predominantemente de tensión y los recuadros en color amarillo indican zonas características de esfuerzos combinados (tensión y compresión).

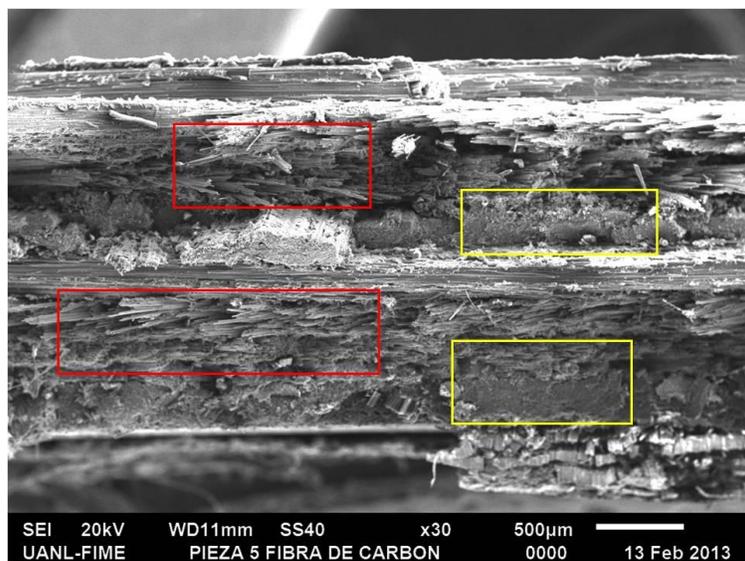


Figura 66. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturada en flexión, a una magnificación de 30x.

La figura 67 es una imagen de la fractura por flexión de una probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono, se pueden apreciar en ésta las diferentes direcciones en las que se encuentran orientadas las fibras. Además, se observa que las fibras están desprendidas de la resina y que tienen muy poca cantidad de resina adherida a las fibras, esto hace que al presentarse los esfuerzos de tensión originados por la flexión se presente el fácil desprendimiento de las fibras de la resina; este mecanismo de fractura se conoce como “pull out” y ha sido reportado

en otras investigaciones y en la literatura de materiales compuestos, como por ejemplo Bryan Harris en su libro *Engineering Composite Materials* (41).

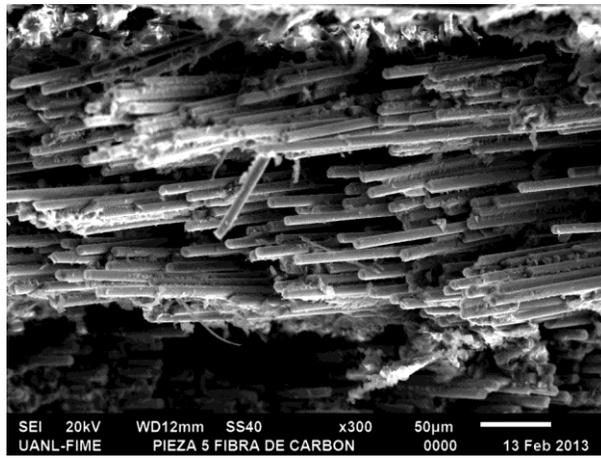


Figura 67. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturada en flexión, a una magnificación de 300x.

En la figura 68 se tiene la imagen de una probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturada en flexión, se puede apreciar una zona aplastada de resina y fibras, tal como le describe Vinod Srinivasa y coautores (42), que se asume estaría del lado de compresión en la flexión.

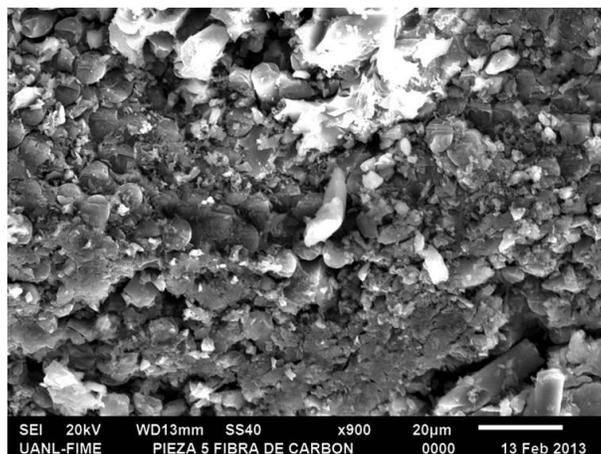


Figura 68. Probeta de resina epóxica reforzada con fibra de carbono en flexión, a una magnificación de 300x.

Capítulo 6. Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo y a la luz del estado del arte, se emiten las siguientes conclusiones:

1. En las probetas de resina poliéster fracturadas en tensión, se presentó un patrón característico de fractura radial.
2. En las probetas de resina poliéster fracturadas en flexión, no se mostraron fracturas radiales (como sí se tuvieron cuando fueron fracturadas en tensión), en lugar se tuvo "*tearing*" causado por la liberación de energía durante el ensayo.
3. En las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio se tuvo una mejor adhesión resina-matriz, en comparación con las de resina poliéster, pues en las probetas de resina epóxica no se observaron grietas tan significativas como en la resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio, asumiendo que la resina epóxica transfiere de una manera más eficiente la carga aplicada hacia las fibras.
4. En las probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio fracturadas en flexión se presentó el mecanismo de fractura denominado "*debonding*", que es la separación de la fibra con la matriz sin llegar necesariamente a una delaminación.
5. El mecanismo de fractura "*debonding*" ocasiona la delaminación en las probetas de resina epóxica y poliéster reforzadas con fibra de vidrio fracturadas en flexión.
6. En las probetas de resinas poliéster y epóxica reforzadas con fibra de vidrio y resina epóxica reforzada con fibra de carbono fracturadas en flexión se presentaron diferentes patrones de fractura a nivel macroscópico:

- Desprendimiento de la fibra de la matriz o *"pull out"*, a nivel macroscópico, en las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de carbono ocasionados por esfuerzos de tensión.
 - Líneas de Chevron, marcas de río, *"microbuckling"* a nivel macroscópico, en probetas de resinas reforzadas con fibra de vidrio, ocasionados por los esfuerzos de tensión.
7. A nivel microscópico, en el ensayo de flexión las probetas de resina poliéster reforzadas con fibra de vidrio presentaron dos superficies diferentes de fractura (patrones similares a las líneas de Chevron y marcas de río); en cambio, las probetas de resina epóxica reforzadas con fibra de vidrio presentan un solo patrón de fractura que describimos como una fractura radial.
 8. Los mecanismos de fractura predominantes en las probetas de resina poliéster/epóxica reforzadas con fibra de vidrio y carbono son: delaminación, ruptura de la fibra.
 9. Si no existía una fuerte adhesión entre la fibra y la matriz ocurría la delaminación, aún y cuando la fibra no se fracturara. En cambio, si la adhesión entre la fibra y la matriz era fuerte, existía la posibilidad de que no se presentara la delaminación y sí la ruptura de la fibra.

Para postular las anteriores conclusiones se identificaron y discutieron los patrones de fractura obtenidos en probetas de materiales compuestos fracturadas en flexión, y luego se relacionaron esos patrones con los probables mecanismos de fractura, describiendo de manera elemental la secuencia de eventos que daban lugar a los patrones observados. Con lo anterior, se cumplieron los objetivos específicos planteados en esta tesis.

Se considera que este trabajo colabora al desarrollo de capacidades para comprender los aspectos físicos en los mecanismos de nucleación y propagación de grietas en materiales compuestos reforzados con fibras, con lo cual se cumple el objetivo general de este proyecto.

Referencias

1. **Committee, ASM International Handbook.** *ASM Handbook volume 21 Composites.* 2001.
2. **Hoa, Suong V.** *Principles of the manufacturing of composite materials.* Canada : DEStech Publications, Inc, 2009. p. 3.
3. **Harris, Bryan.** *Engineering Composites Materials.* London : The Institute of Materials, London, 1999. p. 5.
4. **Aeroespacial, FEMIA Federación Mexicana de la Industria.** *Pro-Aéreo 2012-2020 Programa Estratégico de la Industria Aeroespacial.*
5. **Dieter, George.** *Mechanical Metallurgy.* s.l. : McGraw-Hill, 1976.
6. **Razvan, Raducanu.** *Some remarks on the history of fracture.* s.l. : 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS, SIMULATION, MODELLING, 2009.
7. **Balankin, Dr. Alexander.** *MECÁNICA DE LA FRACTURA: PASADO, PRESENTE Y FUTURO.* s.l. : 5 ° QUINTO CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA Y DE SISTEMAS, 2000. pp. 315-320.
8. **Griffith, A.A.** *The phenomena of rupture and flow in solids.* London : Royal Society of London, 1920. pp. 163-198.
9. **William D. Callister, Jr.** *Materials Science and Engineering.* EUA : John Wiley & Sons, Inc., 2007. pp. 212,213,214.
10. **Bertram, Broberg K.** *Cracks and Fracture.* 1999.
11. **Marder, Michael P.** *Notes on Fracture.* Austin Texas, USA : Center for Nonlinear Dynamics and Department of Physics, 2003. pp. 9-11.
12. **Committee, ASM Handbook.** *ASM Handbook Volume 12 Fractography.* 1987. 9th Edition of Metals Handbook.
13. **Hull, Derek.** *Fractography, Observing, Measuring and interpreting fracture surface topography.* United Kingdom : Cambridge University Press, 1999.
14. **Melo, Martín Edgar Reyes.** *Autoafinidad de superficies de fractura en materiales plásticos.* Monterrey : s.n., 1999. p. 6.
15. **Wiederhorn, S.M.** *Brittle fracture and toughening mechanisms in ceramics.* Florida : UNIVERSITY OF FLORIDA - Smathers Library, 1984.
16. **Sperling, L.H.** *Introduction to physical polymer science.* Bethlehem, Pennsylvania : JOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION, 2006. pp. 560-562.
17. **Askeland, Donald R.** *Ciencia e ingeniería de materiales.* s.l. : Cengage learning, 2011.
18. **Ishai, Isaac M. Daniel Ori.** *Engineering Mechanics of composite materials.* s.l. : Oxford, 2006.

19. **Enrico Mangino, Joe Carruthers, Giuseppe Pitarresi,** *The future use of structural composite materials in the automotive industry.*
20. **Sanjay K. Mazumdar, Ph.D.** *Composites Manufacturing Materials, product and process engineering.* s.l. : COMPOSITES, 2002.
21. **FEDERICO PARIS CARBALLO, JOSE CAÑAS DELGADO, JUAN CARLOS MARIN VALLEJO.** *INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS Y DISEÑO.* Sevilla : Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, 2006.
22. **Ghassemieh, Elaheh.** *Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects.* UK : intechopen, 2011.
23. **Hexcel.** *HexPly® M21 curing epoxy matrix.* 2010.
24. **Chung, Jaeun.** *Nanoscale Characterization of Epoxy Interphase on Copper Microstructures.* Berlín : BAM-Dissertationsreihe • Band 15, 2006. p. 3.
25. **WING-MAI, JANG-KYO KIM and YIU.** *ENGINEERED INTERFACES IN FIBER REINFORCED COMPOSITES.* 1998.
26. **Hiley, E. S. Greenhalgh and M. J.** *FRAC TOGRAPHY OF POLYMER COMPOSITES: CURRENT STATUS AND FUTURE ISSUES.* London, UK : s.n.
27. **S. Sadaba, C. Gonzalez, J. LLorca.** *FAILURE SIMULATION IN LAMINATES OF FIBER-REINFORCED COMPOSITES.* Madrid, España : s.n., 2008.
28. **Masa Suresh Kumara, Kesarabandi Raghavendraa, Magalapalaya Anjanappa Venkataswamy,** *Fractographic Analysis of Tensile Failures of Aerospace Grade Composites.* India : Materials Research. 2012, 2012.
29. **F. Kun, F. Raischel, R. C. Hidalgo, H. J. Herrmann.** *Extensions of fiber bundle models.*
30. **R. C. Hidalgo, K. Kovács, Pagonabarraga, F. Kun.** *Universality class of fiber bundles with strong heterogeneities.* España : s.n.
31. **Wood, Karen.** *Virtual testing of composites: Beyond make & break.* s.l. : compositesworld, 2012.
32. **Berenberg, Barry.** *GENOA modeling software closely predicts composite structural failure.* s.l. : Compositesworld, 2004.
33. **plásticas, Poliformas.** *Resina para proceso de laminación utilizando método de moldeo por aspersion y/o moldeo manual.*
34. **Elizondo, David.** *Análisis de rugosidad en materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (proceso).* 2012.
35. **TORAYCA.** *T700S Data sheet.* California : s.n.
36. **Vinod Srinivasaa, b, Vinay Shivakumara, c, Vinay Nayakaa, Sunil Jagadeeshaiha, Murali Seethrama, d, Raghavendra Shenoya, b, Abdelhakim Nafidie.** *Fracture Morphology of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates.* India : s.n., 2010. pp. 2,3.
37. **ASM., International Handbook.** *Fractography Volume 12.* 1987. p. 840.
38. **Ding, Wei.** *Delamination Analysis of Composite Laminates.* 1999. p. 17.

39. **Wilson, Timothy James.** *MODELING OF IN-PLANE AND INTERLAMINAR FATIGUE BEHAVIOR OF GLASS AND CARBON FIBER COMPOSITE MATERIALS.* 2007. p. 34.
40. **Ruchevskis S., Reichhold J.** *EFFECTIVE ELASTIC CONSTANTS OF FIBER-REINFORCED POLYMER-MATRIX COMPOSITES WITH THE CONCEPT OF INTERPHASE.*
41. **Harris, Bryan.** *Engineering composites.* 1999. p. 105.
42. **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.