



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

“LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA COMO UNA ALTERNATIVA PARA LA
FABRICACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO
P R E S E N T A
MIGUEL AGUSTÍN CASO MORENO

DIRECTOR DE TESIS: I. Q. M. RAFAEL SAMPERE MORALES

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

"Los Materiales Compuestos de Matriz Polimérica como una
Alternativa para la Fabricación de un Digestor Anaerobio"

que presenta el pasante: Miguel Agustín Caso Moreno
con número de cuenta: 9606977-2 para obtener el título de :
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 14 de Agosto de 2008.

PRESIDENTE I.Q.M. Rafael Sampere Morales

VOCAL Dr. Adolfo Obaya Valdivia

SECRETARIO Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez

PRIMER SUPLENTE Q. Celestino Silva Escalona

SEGUNDO SUPLENTE Dr. Ricardo Paramont Hernández García

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

A mi madre, María del Socorro Angelina Moreno Ascencio

Por el apoyo, cariño y comprensión que siempre me haz otorgado. Gracias mamá por creer siempre en mi, todo lo que soy y seré te lo debo a ti. Te quiero mucho.

A mi padre, Luís Antonio Caso Alfaro

Por preocuparte tanto del bienestar de tú familia. Por tus consejos, enseñanzas y ejemplos. Ojala llegue a ser tan buen padre como lo eres tu. Te quiero mucho.

A mi hermano, Luís Antonio Caso Moreno

Por todo el cariño y apoyo que me haz dado toda la vida. Por ser el mejor hermano del mundo. Te quiero mucho.

A mis abuelos

Sixto Moreno Rico,

Josefina Ascencio Lujano,

Constancia Alfaro Cabrera y

Epifanio Caso Gómez; por todo el amor que me han brindado.

A mi novia, Dulce Albina Sánchez López

Por todo tu amor, comprensión y apoyo incondicional. Por alentarme siempre ha seguir adelante. Eres el amor de mi vida. Te amaré por siempre.

A la familia Sánchez López

Con todo mi cariño, gratitud y afecto.

A mis amigos

Por todas las alegrías, tristezas y momentos inolvidables que hemos compartido. En especial a: Omar, Olaf, Israel, Yadira, Yovana, Jessica, Humberto, Jorge y Aurelio.

A mi director de tesis, I.Q.M. Rafael Sampere Morales

Por su ayuda en la realización de este trabajo. Con afecto y respeto.

A mis profesores.

INDICE

Objetivos.

Introducción.

Capítulo 1. Materiales compuestos. 1

1.1. Definición. 1

1.2. Clasificación. 4

1.3. Sistemas de materiales compuestos. 13

Capítulo 2. Materias primas de los materiales compuestos de matriz polimérica. 17

2.1. Fibras. 17

2.2. Matrices. 33

2.3. Cargas y aditivos. 38

2.4. Adhesivos estructurales. 41

2.5. Recubrimientos. 43

2.6. Materiales para estructuras tipo sándwich. 44

Capítulo 3. Desarrollo de los materiales compuestos de matriz polimérica. 47

3.1. Fabricación de fibras. 48

3.1.1. Hilado de fundido. 48

3.1.2. Hilado en solución. 49

3.1.3. Pirólisis controlada. 51

3.1.4. Procesos de fase vapor. 52

3.1.5. Sinterizado. 53

3.1.6. Reacción química. 53

3.1.7. Arreglo de las fibras.	54
3.2. Procesos de fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica.	55
3.2.1. Moldeo por Transferencia de Resina (RTM).	56
3.2.2. Materiales Compuestos de Moldeado de Láminas (SMC).	57
3.2.3. Materiales Compuestos de Moldeado en Volumen (BMC).	58
3.2.4. Devanado de Filamentos.	58
3.2.5. Otros procesos de fabricación.	63
3.3. Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica.	65
Capítulo 4. Problema de corrosión en un digestor anaerobio.	67
4.1. Descripción del proceso anaerobio de tratamiento de aguas residuales.	67
4.2. Etapas de la digestión anaerobia.	71
4.3. El fenómeno de la biocorrosión.	73
4.4. Propuesta de un material compuesto de matriz polimérica para la fabricación de un digestor anaerobio.	76
Conclusiones.	83
Bibliografía.	85

OBJETIVO

- Proponer un material compuesto Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) como material resistente a la corrosión para la fabricación de un reactor anaerobio en un proceso de tratamiento de aguas de una industria de procesamiento de alimentos.

INTRODUCCIÓN

En la profesión de ingeniería, los materiales son elementos de todas las ramas de la misma. La ingeniería puede definirse como la profesión en la que se aplica con criterio un conocimiento de las ciencias matemáticas y naturales, adquirido por el estudio, la experiencia y la práctica, con objeto de desarrollar formas de utilización económica de los materiales y las fuerzas de la naturaleza para el beneficio de la humanidad. De acuerdo con esta definición se comprende que la ingeniería es una actividad profundamente humana que llega a la vida de todos los miembros de la sociedad.

Existen muchas diferencias entre las funciones y los métodos de los ingenieros con respecto a los científicos. La actividad de los ingenieros es una actividad integradora, emplea un método intuitivo, global, y en algunas ocasiones, empírico; por el contrario, el científico es reduccionista, se ve en la necesidad de descomponer un problema en sus elementos más básicos, para aclarar los principios fundamentales. El ingeniero con frecuencia debe resolver problemas utilizando conocimientos de diversas disciplinas para producir artículos. En tales casos un ingeniero debe definir las condiciones de funcionamiento del proceso y las variables que desea controlar, y desarrollar una estrategia que permita avanzar al proyecto en forma segura, ordenada y económica.

Al enfrentar un trabajo el ingeniero tiene una cantidad casi infinita de materiales entre los cuales escoger. En algunos casos los materiales pueden ser utilizados sin requerir apenas modificaciones, mientras que en otros casos será necesario un procedimiento adicional para obtener las propiedades deseadas. Para elegir al mejor material para una aplicación, se deben determinar las propiedades que se requieren, para entonces ver que material reúne esas propiedades al menor costo.

Pero es necesario que no solo se considere el costo inicial del artículo, ya que puede tener un costo inicial alto, pero a través de su vida útil, tomando en cuenta todos los factores, el costo puede ser bajo. Se deben de tomar en cuenta factores como la fiabilidad, costo de reemplazo, costo de tiempo fuera de servicio, costo de limpieza del ambiente o de disposición, y otros más. Por ejemplo, las raquetas de tenis o los esquís fabricados con materiales compuestos, de fibra de carbón embebidas en una matriz de epóxico. Si bien el costo inicial de esos artículos es relativamente alto, son mucho menos caros que los artículos de metal o de madera que sustituyeron, y más durables.

En las industrias del ramo alimenticio como son por citar algunas: cervecera, procesadoras de origen vegetal o animal, cómo son fábricas de conservas, procesos lácteos, papeleras; generan en su proceso aguas que deben ser tratadas antes de poder ser descargadas al drenaje. Una opción para este tratamiento son los procesos anaerobios; en los cuales se generan gases como el metano y CO_2 , pero también debido a los requerimientos del proceso se forma ácido sulfhídrico que es altamente corrosivo. Es por este motivo que en el presente trabajo se propone como una posible solución al problema de biocorrosión en el proceso de tratamiento anaerobio; con un enfoque monográfico, el empleo de materiales compuestos de matriz polimérica en sustitución del acero inoxidable utilizado comúnmente. Aunque esto significa un costo mayor en la etapa inicial, este se verá amortizado con la resistencia química que ofrece el material y su durabilidad.

CAPÍTULO I

MATERIALES COMPUESTOS.

1.1. DEFINICIÓN.

Los materiales compuestos se forman a partir de la combinación de dos o más materiales en la que uno de ellos, llamada fase de refuerzo tiene la forma de fibras, partículas o filamentos (whiskers), y está embebido en otro material, llamado fase matriz. Por lo común, la fase matriz es denominada fase continua y la fase de refuerzo se dice que es la fase dispersa. Los materiales de elaboración del refuerzo y de la matriz pueden ser metales, cerámicas o polímeros. Lo característico es que los materiales de refuerzo posean gran resistencia mecánica, con baja densidad, mientras que la matriz suele ser un material dúctil o tenaz. Hay muchos materiales compuestos en la naturaleza, como la madera, que en esencia consiste en fibras de celulosa en una matriz de hemicelulosas y lignina, y los huesos, que están formados por colágeno proteico blando y minerales duros llamados apatitos. Sin embargo, la mayor parte de los materiales compuestos modernos son sintéticos.

Los materiales compuestos están diseñados para aprovechar las características más favorables de cada material, y al mismo tiempo eliminar, o al menos reducir, las propiedades negativas de los componentes. Si el material compuesto se diseña y se fabrica en forma correcta, en él se combinan la resistencia del refuerzo con la tenacidad de la matriz, y se logra una combinación de propiedades deseables que no tenía ninguno de los materiales convencionales. La desventaja es que, por lo general, los materiales compuestos artificiales son más costosos que los convencionales.

Se han desarrollado los materiales compuestos para llenar las necesidades de materiales artificiales con propiedades inusuales, por ejemplo, gran resistencia específica, es decir, relación grande entre resistencia a la tensión y densidad, y de rigidez específica (relación entre elasticidad y densidad), o una combinación de gran resistencia y tenacidad que no tiene ningún material. Ya siglos antes de nuestra era se usaban materiales compuestos como tabiques de lodo reforzado con paja para construir cabañas, y se hacían arcos laminados con madera, tendones de animales y seda. Siglos después, los hermanos Wright usaron fibras y goma laca para reforzar la estructura de su avión.

Sin embargo, la historia de los modernos materiales compuestos comienza con la introducción de las resinas fenólicas reforzadas con tela en la década de 1930, y los plásticos reforzados con fibra de vidrio en la década de 1940. Desde entonces se ha producido un flujo constante de nuevos materiales compuestos.

Los materiales compuestos reforzados con fibra unidireccional, es decir, materiales compuestos en los que todas las fibras se alinean entre sí, son resistentes en la dirección del alineamiento, pero débiles en la dirección transversal. Esto es, casi todos los materiales reforzados con fibras son anisotrópicos. Por otro lado, los materiales reforzados con partículas, como el concreto, tienen un comportamiento casi isotrópico. Como se ve en la figura 1.1, el concreto contiene una mezcla de partículas pequeñas de arena y de piedras grandes de grava, en una matriz de cemento. Como las partículas se pueden considerar esféricas en primera aproximación, y están mezcladas en forma aleatoria, todas las direcciones en el concreto son equivalentes.

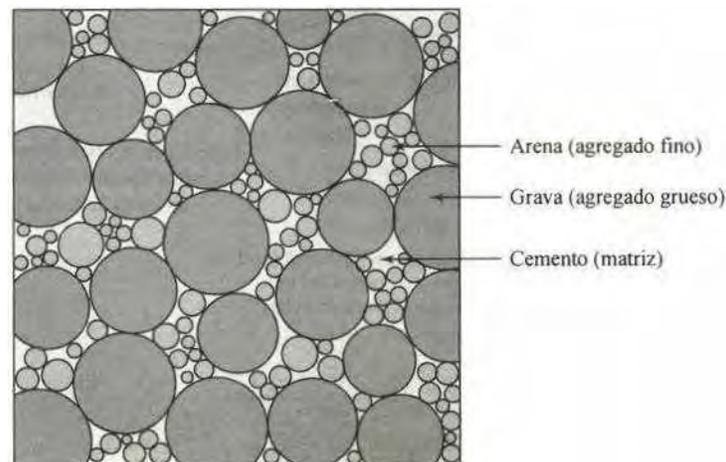


Figura 1.1 Esquema de la estructura ideal del concreto, con grandes piedras de grava y pequeñas partículas de arena en una matriz de cemento. La gran distribución de tamaños de partícula contribuye a lograr una mayor fracción volumétrica de la fase de refuerzo.

En la figura 1.2 se indican las resistencias específicas en función de los módulos de elasticidad específico de diversos materiales compuestos y convencionales. Los materiales de la esquina superior derecha de la gráfica son convenientes, por su gran rigidez y gran resistencia específicas. Los materiales compuestos fibrosos tienen mayores calificaciones, en forma consistente, que los materiales convencionales.

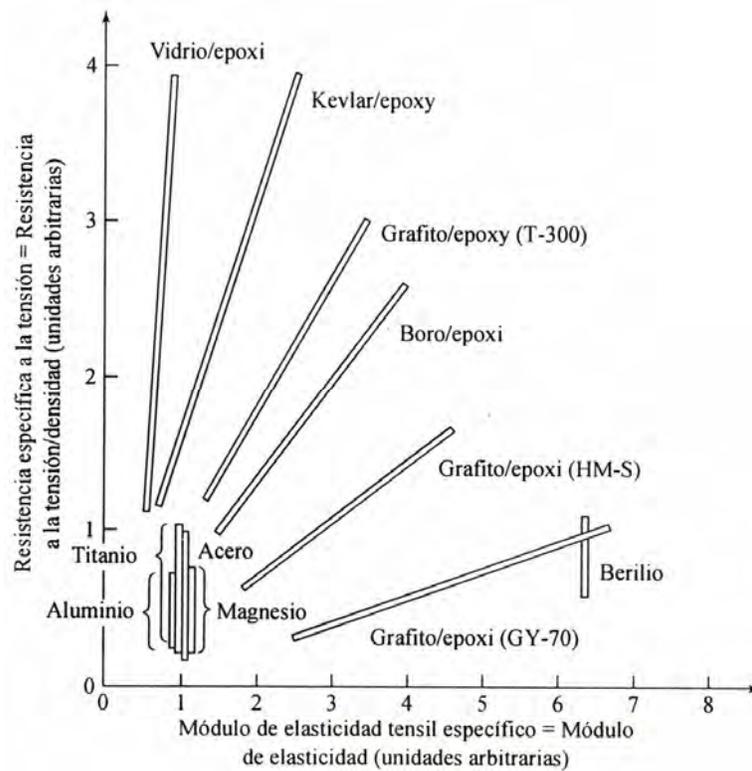


Figura 1.2 Gráfica de la resistencia específica en función del módulo de elasticidad específico para varios materiales estructurales monolíticos, y materiales compuestos a base de polímeros. Los datos de la figura demuestran la superioridad de los materiales compuestos como materiales estructurales.

En cualquier clase de materiales reforzados con fibra, los que tienen los máximos valores de resistencia y módulo de elasticidad específicas suelen tener todas sus fibras alineadas en una dirección, es decir, son materiales con refuerzo unidireccional de fibras. Si se conoce la dirección de carga (y si siempre es la misma), se puede diseñar y fabricar el material de tal modo que la dirección resistente y rígida, la de las fibras, coincida con la dirección de carga; en este caso, no es problema la debilidad en las otras direcciones. Sin embargo, si no se conoce la dirección de la carga, o si varía con el tiempo, se necesita un material compuesto que sea casi isotrópico. Las fibras se deben disponer de tal forma que una parte de ellas esté orientada en cada una de las diversas direcciones dentro del material. Con este tipo de arquitectura de fibras se obtienen propiedades intermedias entre las de las direcciones fuertes y débiles en los materiales con fibras alineadas. Los datos del extremo inferior izquierdo de los intervalos de la figura 1.2 corresponden a los materiales compuestos casi isotrópicos.

Debido a la diversidad de materiales disponibles para refuerzo y matriz, y a la capacidad de combinarlos en un amplio margen de fracciones volumétricas, se pueden producir materiales

compuestos con una gran gama de propiedades, entre las que sobresalen las combinaciones de módulo de elasticidad, resistencia y tenacidad. La facilidad de adaptar sus propiedades a necesidades específicas es uno de sus principales atributos; otra ventaja respecto a los materiales convencionales es que los compuestos se pueden diseñar de forma que tengan propiedades específicas en direcciones específicas; es decir, que su anisotropía puede ser benéfica.

1.2. CLASIFICACIÓN.

Los materiales compuestos pueden ser clasificados en función del tipo de refuerzo.

TABLA 1.1 Clasificación de los materiales compuestos en función del tipo de refuerzo.

Materiales Compuestos Particulados	Dispersiones (Aluminio Sinterizado, Torio)
	MC de Partículas (Carburos Cementados, Polímeros)
Materiales Compuestos de Fibras	Fibra Corta (Aleatoria)
	Fibra Larga (Unidireccional)
	Fibra Larga (Textil)

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS POR DISPERSIÓN.

El grupo de materiales compuestos reforzados por dispersión, poseen fracciones volumétricas de la fase de refuerzo de aproximadamente 0.15, y están clasificados como materiales compuestos particulados (Tabla 1.1). El mecanismo de fortalecimiento en los materiales compuestos por dispersión es distinto del que tienen el concreto o los materiales reforzados con fibras. En los materiales compuestos reforzados por dispersión, la falta de coincidencias de los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y los dispersoides da como resultado una gran densidad de dislocaciones en la matriz metálica durante el enfriamiento desde la temperatura de fabricación. Por consiguiente, el endurecimiento por deformación de la matriz aporta bastante a la resistencia del material compuesto.

A la temperatura ambiente, los materiales compuestos reforzados por dispersión pueden ser más débiles que las aleaciones que contienen un precipitado coherente. Sin embargo, dado que los materiales compuestos no se ablandan de manera catastrófica por crecimiento de granos o engrosamiento de la fase dispersa, la resistencia de los mismos se reduce sólo de manera gradual al

incrementarse la temperatura (figura 1.3). Además, su resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y las aleaciones.

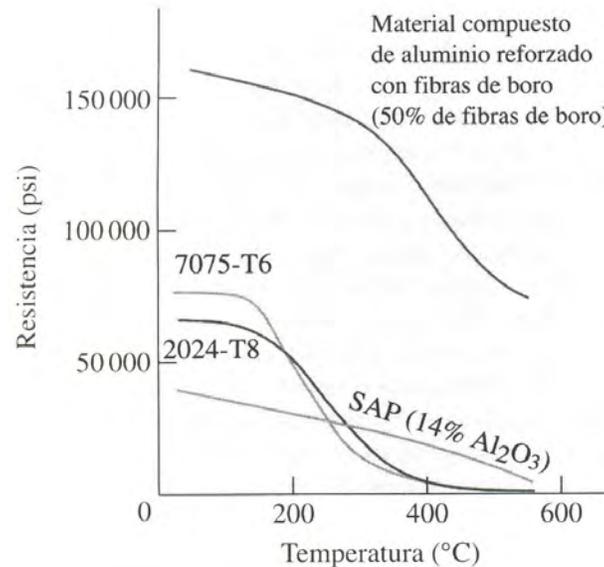


Figura 1.3 Comparación de la resistencia de cedencia del material compuesto de polvo de aluminio sinterizado endurecido por dispersión (SAP, sintered aluminum powder), con el de dos aleaciones de aluminio bifásicas de alta resistencia convencionales. El material compuesto tiene ventaja por encima de aproximadamente 300°C. Como punto de comparación, se muestra un material compuesto de aluminio reforzado.

El dispersoide debe tener una baja solubilidad en la matriz y no debe reaccionar químicamente con la misma, pero una pequeña cantidad de solubilidad podría ayudar a mejorar los enlaces entre el dispersante y la matriz. El óxido de cobre (Cu_2O) se disuelve en el cobre a altas temperaturas; por tanto, el sistema Cu_2O –Cu no resultaría eficaz. Sin embargo, el Al_2O_3 sí logra un material reforzado por dispersión eficaz.

La tabla 1.2 muestra una lista de algunos materiales de interés. Quizás el ejemplo clásico es el material compuesto de polvo de aluminio sintetizado o SAP. Éste tiene una matriz de aluminio endurecida con hasta 14% de Al_2O_3 . El material compuesto se conforma utilizando metalurgia de polvos. En un primer método se mezclan polvos de aluminio y de alúmina, se compactan a alta presión y se sinterizan. En un segundo método, el polvo de aluminio se trata para agregar una película continua de óxido en cada partícula. Una vez compactado el polvo, durante el sinterizado, la película de óxido se rompe en minúsculas escamas rodeadas por el metal de aluminio.

Otro grupo importante de materiales compuestos reforzados por dispersión incluye los metales con torio disperso; por ejemplo, el níquel TD. Este níquel puede producirse mediante oxidación interna. El torio está presente en el níquel como elemento de aleación. Una vez fabricado un polvo compacto, se permite la difusión del oxígeno dentro del metal, para que reaccione con el torio y produzca toria (ThO_2).

TABLA 1.2 Ejemplos y aplicaciones de materiales compuestos reforzados por dispersión.

SISTEMA	APLICACIONES
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
Al- Al_2O_3	Uso posible en reactores nucleares
Be-BeO	Reactores aeroespaciales y nucleares
Co- ThO_2 , Y_2O_3	Posible uso en materiales magnéticos resistentes a la termofluencia
Ni-20% Cr- ThO_2	Componentes de motores turborreactores
Pb-PbO	Rejillas para batería
Pt- ThO_2	Filamentos, componentes eléctricos
W- ThO_2 , ZrO_2	Filamentos, calefactores

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS.

Los materiales compuestos reforzados con partículas contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean con eficacia el deslizamiento. Estos compuestos están diseñados para producir combinaciones poco usuales de propiedades y no para mejorar la resistencia.

Ciertas propiedades de un material compuesto reforzado con partículas dependen sólo de las cantidades y propiedades relativas de los constituyentes individuales. La regla de las mezclas puede predecir estas propiedades con exactitud. Por ejemplo, la densidad de un material compuesto particulado es:

$$\rho_c = \sum (V_i \cdot \rho_i) = V_1 \cdot \rho_1 + V_2 \cdot \rho_2 + \dots + V_n \cdot \rho_n \quad (1.1)$$

donde ρ_c es la densidad del compuesto, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ son las densidades de cada uno de los constituyentes del compuesto, y V_1, V_2, \dots, V_n son las fracciones volumétricas de cada uno de los constituyentes. Obsérvese que también es muy importante la conectividad de las distintas fases (por ejemplo, la forma en que la fase dispersa está organizada con respecto a la fase continua).

Los carburos cementados, o cermets, contienen partículas cerámicas duras dispersas en una matriz metálicas. Los insertos de carburo de tungsteno que se utilizan para las herramientas de corte en operaciones de maquinado son típicas de este grupo. El carburo de tungsteno es un material cerámico duro, rígido y con una elevada temperatura de fusión. Para mejorar la tenacidad, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con polvo de cobalto y se comprimen en preformas de polvo compactado. Estas últimas se calientan por encima de la temperatura de fusión del cobalto. El cobalto líquido rodea cada una de las partículas sólidas de tungsteno (figura 1.4). Después de la solidificación, el cobalto sirve como unión para el carburo de tungsteno y se obtiene una buena resistencia al impacto. Otros carburos, como el TaC y el TiC, también pueden incluirse en los cermets.

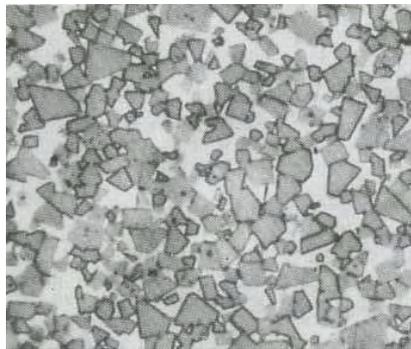


Figura 1.4 Microestructura del carburo de tungsteno, con un 20% de cobalto cementado (1300x)

Como se ve en la figura 1.1, otro ejemplo de estos materiales compuestos reforzados con partículas es el concreto, mezcla de agregado fino en forma de arena y agregado grueso en forma de grava, en una matriz de cemento (aluminosilicato de calcio). Mezclando partículas grandes y pequeñas, la fracción volumétrica del refuerzo se puede aumentar, porque las partículas pequeñas pueden caber en las cavidades que dejan las partículas grandes. Las fracciones volumétricas normales de agregados (fino y grueso) en el concreto son de 0.60 a 0.75. El agregado fortalece al concreto en dos formas. Primero, la resistencia inherente del agregado a la compresión es mayor que la de la matriz. Segundo, la gran fracción volumétrica de partículas de agregado de forma irregular proporciona resistencia a la compresión a través de interacciones mecánicas. Como ventaja adicional, el agregado es menos costoso que el cemento, por lo que las grandes fracciones volumétricas de agregados reducen el costo de este material compuesto. De forma parecida, el asfalto de las carreteras, formado por un 90% de agregado y 10% de asfalto propiamente dicho, en un material de bajo costo y adecuado para sus funciones.

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS.

La mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras obtienen una mayor resistencia, una mejor resistencia a la fatiga, mejor módulo de Young y una mejor relación resistencia a peso al incorporar fibras resistentes, rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y más dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, mismas que soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del material compuesto puede resultar alta, tanto a la temperatura ambiente como a temperaturas elevadas (figura 1.3).

Se utilizan muchos tipos de fibras como materiales de refuerzo. Como se mencionó anteriormente, durante siglos se usó la paja para reforzar los tabiques de barro. En las estructuras de concreto se introducen varillas de acero como refuerzo. En los materiales compuestos avanzados, basados en matrices de polímeros, metales, materiales cerámicos, se utilizan fibras hechas de boro, carbono, polímeros (por ejemplo, aramidas) y materiales cerámicos, con la finalidad de proporcionar un refuerzo excepcional.

Al diseñar un material compuesto reforzado con fibras, deben tomarse en consideración muchos factores, incluyendo longitud, diámetro, orientación, cantidad y propiedades de las mismas, así como las propiedades de la matriz y de la unión entre ambas.

Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo, sus dimensiones se caracterizan en función de la relación de aspecto l/d , donde l es la longitud de la fibra y d su diámetro. Las fibras comunes tienen diámetros que varían desde $10\ \mu\text{m}$ ($10 \times 10^{-4}\ \text{cm}$) hasta $150\ \mu\text{m}$.

La resistencia del material compuesto se mejora cuando la relación de aspecto es grande. Con frecuencia las fibras se fracturan debido a defectos superficiales. Al hacer que los diámetros sean tan pequeños como sea posible, las fibras tienen menos área superficial y, en consecuencia, menos defectos que pudieran propagarse durante el proceso o bajo carga. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; en consecuencia, cuantos menos extremos existan, mayor será la capacidad de absorción de carga de las fibras (Figura 1.5).

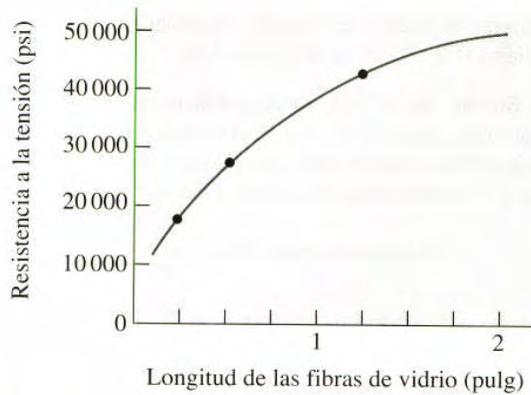


Figura 1.5 Si se incrementa la longitud de las fibras de vidrio E cortadas existentes en una matriz de resina epóxica, se aumenta la resistencia del material. En este ejemplo, la fracción volumétrica de fibras de vidrio es de aproximadamente 0.5.

En muchos sistemas reforzados con fibra, se utilizan fibras discontinuas con una relación de aspecto superior al de cierto valor crítico para llegar a un término medio aceptable entre facilidad de proceso y propiedades. Se puede llegar a determinar una longitud crítica de la fibra l_c , para cualquier diámetro de fibra d dada:

$$l_c = \frac{\sigma_{tsf} d}{2\tau_i} \quad (1.2)$$

Donde σ_{tsf} es la resistencia a la tensión de la fibra y τ_i está relacionada con la resistencia de la unión entre fibra y matriz o con el esfuerzo con el cual la matriz empieza a deformarse. Si la longitud de la fibra l es inferior a l_c , se observará poco efecto de refuerzo; si l es más larga que aproximadamente $15 l_c$, la fibra se comportará casi como si fuera continua. La resistencia de material compuesto se puede estimar a partir de

$$\sigma_c = V_f \sigma_{tsf} \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + V_m \sigma_m \quad (1.3)$$

Donde σ_m es el esfuerzo que se ejerce sobre la matriz cuando las fibras se rompen.

Una fracción volumétrica mayor de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del material compuesto, como podríamos esperar a partir de la regla de las mezclas. Sin embargo, la fracción volumétrica máxima es de aproximadamente 80%, con un valor mayor a este las fibras ya no pueden estar totalmente recubiertas o rodeadas por la matriz.

Hay un factor adicional que determina también las propiedades de los materiales compuestos, que es el arreglo y orientación de las fibras, llamado también arquitectura de las fibras. Las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con diversas orientaciones. Las fibras cortas (Whiskers) de orientación aleatoria y con una pequeña relación de forma son fáciles de introducir en la matriz y le dan al material compuesto un comportamiento relativamente isotrópico.

Los materiales compuestos unidireccionales como se menciono con anterioridad, tienen todas sus fibras orientadas en una sola dirección. La figura 1.6 muestra los distintos arreglos geométricos posibles en el plano perpendicular a la dirección de las fibras, que se llama plano transversal. Esos arreglos pueden ser rectangulares, cuadrados y hexagonales. Un arreglo hexagonal de fibras tiene la misma distancia mínima entre centros de fibras vecinas en tres direcciones del plano transversal. Debido a esa simetría, esos materiales compuestos se comportan casi como materiales isotrópicos en el plano transversal, y se llaman transversalmente isotrópicos. Sin embargo, independientemente de la arquitectura de las fibras, las propiedades de los materiales compuestos unidireccionales en el plano transversal son mucho muy inferiores a las medidas en dirección de las fibras. Por consiguiente, esos materiales compuestos no son adecuados en aplicaciones donde haya carga multiaxial o multidireccional.

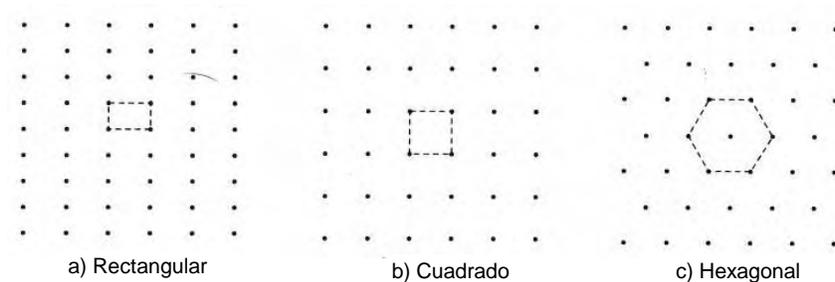


Figura 1.6 Arreglos rectangular, cuadrado y hexagonal de fibras en materiales compuestos unidireccionales. El arreglo hexagonal da como resultado un material isotrópico transversalmente.

Los arreglos de fibras largas, o incluso continuas y unidireccionales, producen propiedades anisotrópicas, con una resistencia y una rigidez particularmente buenas en dirección paralela a las fibras. Estas fibras se conocen como capas de 0° , lo cual muestra que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. Sin embargo, las orientaciones unidireccionales les originan malas propiedades si la carga es perpendicular a dichas fibras (figura 1.7).

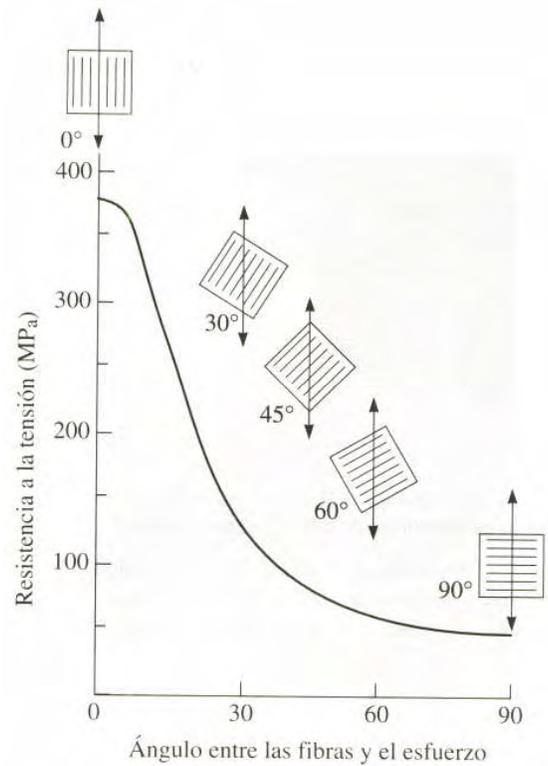


Figura 1.7 Efecto de la orientación de la fibra sobre la resistencia a la tensión de materiales compuestos de matriz epoxi reforzados con fibras de vidrio E.

Una de las características únicas de los materiales compuestos reforzados con fibras es que se pueden diseñar sus propiedades para que cubran diferentes tipos de condiciones de carga. Los compuestos laminados se pueden diseñar de forma que tengan sus fibras arregladas en distintas direcciones. La figura 1.8 señala materiales compuestos unidireccionales en forma de láminas delgadas apiladas de manera que las fibras estén orientadas formando ángulos de 0° , 90° y $\pm 45^\circ$. Esas láminas se pueden apilar en un orden regular para formar el compuesto laminado. Si las fibras sólo forman ángulos de 0° y 90° , la resistencia del material es alta en esas direcciones, pero el conjunto tiene poca resistencia cortante. Para que la resistencia cortante sea buena, las fibras en la pila también deben tener orientaciones de $\pm 45^\circ$. Esos laminados son resistentes en todas las direcciones del plano que contienen las fibras, pero son débiles en la dirección normal a los planos de las fibras.

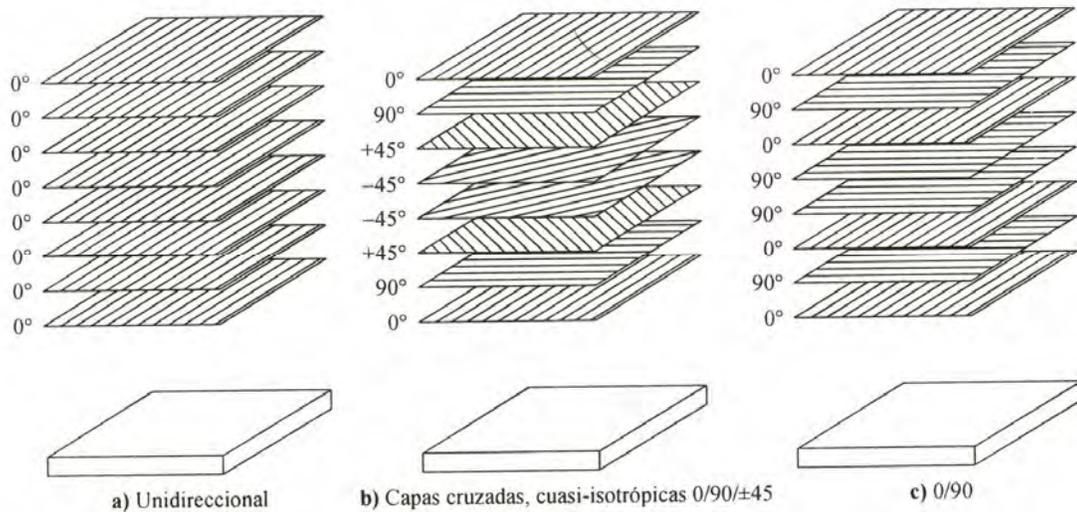


Figura 1.8 Arreglos de fibras en materiales compuestos laminados. a) Unidireccional, b) con capas cruzadas, transversalmente isotrópicas con fibras en direcciones de 0° , 90° y $\pm 45^\circ$; c) laminados en dos direcciones con las fibras en ángulos de 0° y 90° .

Otra clase de arreglo de fibras es una tela de dos dimensiones, como se ve en la figura 1.9. Es posible tener tejidos tridimensionales que dan como resultado materiales compuestos con propiedades casi isotrópicas. Incluso en el más simple de los tejidos, las fibras de cada capa individual de tela tienen algún pequeño grado de orientación en una tercera dirección. También se puede obtener una red tridimensional de fibras orientando al azar fibras discontinuas. Esos materiales también tienen propiedades isotrópicas y son menos costosos que sus contrapartes tejidas; sin embargo, sus propiedades son inferiores a causa de la corta longitud de fibras y fracciones volumétricas inherentemente menor de ellas. Igualmente es posible utilizar tejidos tridimensionales más complejos (figura 1.10).

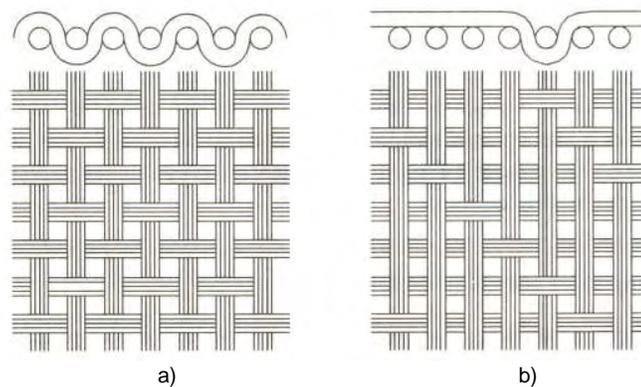


Figura 1.9 Arquitectura de un tejido bidimensional de tela: a) tejido plano, y b) tejido satinado de 5 urdimbres con 1 trama.

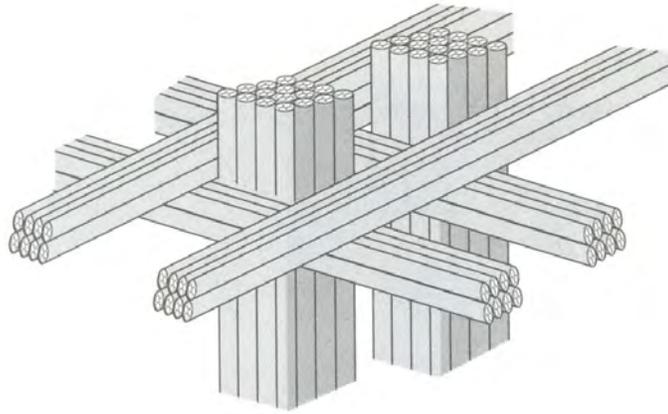


Figura 1.10 Tejido tridimensional para materiales compuestos reforzados con fibras.

1.3. SISTEMAS DE MATERIALES COMPUESTOS.

Ya hemos clasificado a los materiales compuestos como reforzados por dispersión, reforzados con partículas, de refuerzo de fibras continuas y discontinuas, de trama bi y tridimensional de refuerzo, etcétera. Esas clasificaciones se basan en la arquitectura y las características de la fase de refuerzo. Frecuentemente es también conveniente clasificar los materiales compuestos por las propiedades del tipo de material que conforma la matriz, como de matriz de metal, de polímero, de cerámica y de carbono-carbono.

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA.

Estos materiales se fabrican con una aspersion del material de la matriz con plasma sobre las fibras tendidas en forma adecuada, con métodos de infiltración de líquido, con deposición física de vapor, con prensado en caliente, con colado forzado, por mencionar algunos métodos.

Los materiales compuestos de matriz metálica tienen buenas posibilidades en alta temperatura, buenas propiedades transversales y resistencias razonables a la compresión y al esfuerzo cortante, en parte debido a una combinación de buena resistencia y tenacidad de la matriz metálica, y buena liga interfacial. Los sistemas más frecuentes de dichos materiales son los de fibras de boro en una matriz de aluminio, las fibras o filamentos de SiC en una matriz de aluminio, SiC en una matriz de titanio y fibras de carbono en matrices de magnesio, cobre o aluminio. Entre sus aplicaciones están las cabezas de pistones para motores automotrices, las bielas en esos motores, los álabes de turbinas de gas, los

domos de radar y los paquetes electrónicos. En la tabla 1.3 se presentan las propiedades características de algunos materiales compuestos de matriz metálica.

TABLA 1.3 Propiedades de algunos materiales compuestos con matriz de cerámica y matriz polimérica, en direcciones longitudinal y transversal.

Matriz	Fibra	Fracción volumétrica	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (GPa)		Resistencia a la tensión (MPa)	
				Long.	Trans.	Long.	Trans.
Al	B	0.50	2.65	210	150	1500	140
Ti-6Al-4V	SiC	0.35	3.86	300	150	1750	410
Al-Li	Al ₂ O ₃	0.60	3.45	262	152	690	180
Epóxico	Vidrio E (unidireccional)	0.60	2.0	40	10	780	28
Epóxico	Tela bidireccional de fibra de vidrio	0.35	1.7	16.5	16.5	280	280
Epóxico	Boro (unidireccional)	0.60	2.1	215	9.3	1400	63
Epóxico	Carbono	0.60	1.9	145	9.4	1860	63
Poliéster	Fibras de vidrio cortadas	0.70	1.8	55-138	–	103-206	–

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

Estos materiales son los característicos del grupo. Pueden tener excelentes propiedades a temperatura ambiente, a un costo relativamente bajo. Se han usado ya desde hace 40 años. Dos de los usos más conocidos a principio de la década de 1950 fueron en la carrocería del Chevy Corvette y los cascos de los yates. La matriz consiste en diversas resinas termofijas y, en termoplásticas en fechas más recientes, reforzadas con fibra de vidrio, boro, carbono o materiales orgánicos. En la tabla 1.3 se ven las propiedades mecánicas y físicas de algunos materiales compuestos con matriz polimérica característicos.

Las aplicaciones tradicionales de estos materiales, era en las estructuras aeroespaciales sometidas a cargas. Ahora se usan en vigas I en estructuras civiles, en diversas partes automotrices, en neumáticos con lonas de acero y en artículos deportivos. Su costo ha disminuido en forma continua, y esto las hace lo bastante atractivas para su uso en artículos al consumidor. Otra aplicación floreciente es en estructuras arquitectónicas, como el Georgia Dome: el techo es de unas 4 hectáreas de colchoneta tramada de fibra de vidrio en una matriz de politetrafluoroetileno.

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA.

Las cerámicas son bien conocidas por su resistencia a la oxidación y a la fluencia a alta temperatura. En consecuencia, si se pudiera controlar su comportamiento frágil, serían excelentes candidatos para emplear en componentes de partes calientes en motores automotrices y de turbinas de gas para aviación, como por ejemplo álabes, rodetes, pistones y rotores. La tenacidad de las cerámicas se puede elevar embebiendo fibras de cerámica en matrices de este material. Entre los ejemplos están el SiC reforzado con SiC, el nitruro de silicio (Si_3N_4) reforzado con SiC, y el vidrio reforzado con fibras de carbono. En la tabla 1.4 se indican la resistencia a la flexión de algunos compuestos característicos de cerámicas reforzadas con cerámicas.

TABLA 1.4 Propiedades de algunas cerámicas y compuestos con matriz cerámica representativos.

Matriz	Fibra	Resistencia a la flexión (MPa)
Al_2O_3	–	350 – 700
MgO	–	200 – 500
SiC	–	500 – 800
Vidrio de SiO_2	–	70 – 150
Al_2O_3	Filamentos de SiC	800
Vidrio de SiO_2	Fibras de SiC	1000
Al_2O_3	Partículas de BN	350

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ CEMENTÍFICA.

Estos materiales se han usado desde hace mucho en la forma de concreto reforzado. Por su baja resistencia a la tensión su uso se ha limitado a estructuras sometidas a cargas de compresión.

Un agregado es una combinación de grava, arena, piedras trituradas o escorias. Un mortero se hace mezclando cemento, agua, aire y un agregado fino. El concreto contiene todos los ingredientes del mortero más los agregados gruesos. Los cementos son materiales inorgánicos que se aplican y endurecen después de ser mezclados para formar una pasta usando agua. El concreto es un material compuesto particulado (o constituido con agregados) en el cual tanto los agregados como la matriz son materiales cerámicos. En el concreto, la arena y un agregado grueso se unen en una matriz de cemento. Una reacción de cementación que ocurre entre el agua y los minerales del cemento proporciona una matriz resistente que sujeta los agregados y proporciona una resistencia buena a la compresión para el concreto.

Sin embargo, debido a las propiedades y a las interfases presentes en la estructura frágil, tiene muy mala resistencia a la tensión. Para mejorar la capacidad de soportar cargas a tensión del concreto, se deben utilizar refuerzos. Con frecuencia se introducen varillas de acero, alambrión o malla de acero, a fin de mejorar la resistencia del concreto a la tensión y a la flexión. Los esfuerzos a tensión se transfieren del concreto al acero, que tiene buenas propiedades tensiles. También se pueden utilizar fibras poliméricas, que tienen mayor resistencia a la corrosión, como refuerzo. Por lo que se refiere a los esfuerzos a flexión, el refuerzo soporta la parte sujeta a tensión; la parte bajo compresión la soporta el concreto.

MATERIALES COMPUESTOS CARBONO – CARBONO.

Como su nombre lo dice, en esta clase de materiales compuestos reforzados con fibras, tanto la matriz como la fase de refuerzo se fabrican con carbono. Estos materiales tienen una combinación única de propiedades entre las que destacan la capacidad de resistir temperaturas de servicio extremadamente altas, mayores a 3000°C, gran resistencia específica, excelente resistencia al desgaste, porque pueden ser autolubricantes, buena resistencia al choque térmico y facilidad de maquinado razonable. La temperatura máxima de uso para esos compuestos se limita por problemas de oxidación. Entre las aplicaciones típicas están componentes de frenos, pantallas térmicas y toberas de cohetes; no están los artículos para el hogar debido al alto costo. Los materiales compuestos carbono – carbono se pueden fabricar con los métodos de deposición de vapores, impregnando fibras de grafito con un polímero a base de carbono que a continuación se piroliza para quemar y eliminar los átomos del polímero que no sean de carbono, o combinando estos dos métodos.

CAPÍTULO II

MATERIAS PRIMAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.

Un material compuesto, como ya se ha mencionado, presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado y también suprimen sus defectos individuales.

En esta sección describiremos las propiedades de los materiales de refuerzo y de matriz, y las de otros tipos de componentes como cargas y aditivos, que en conjunto son responsables de las características excepcionales de los materiales compuestos.

TABLA 2.1 Materias primas que componen un material compuesto.

FIBRAS	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Alúmina)
	Fibras Metálicas
	Fibras Inorgánicas (Carbono, Vidrio, Boro)
	Fibras Orgánicas (Aramida, Polietileno)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (Cemento, Geopolímeros, Yeso)
	Matrices Termoestables (Epoxi, Viniléster, Poliéster, Fenólica, Esteres cianato, Bismaleimidias, Poliimidias, Polieteramida)
	Matrices Termoplásticas (ABS, Polipropileno, Policarbonato, Acetato, PBT, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS)
NÚCLEOS	Nidos de Abeja (Aluminio, Nomex, Polipropileno)
	Espumas (poliuretano, Poliestireno, PVC)
ADHESIVOS	Epoxi, Poliuretano, Acrílicos
RECUBRIMIENTOS	Cerámicos, Fenólicos, Epoxi + Arena, Intumescentes, Mats

2.1. FIBRAS.

La forma geométrica más común de la fase de refuerzo de un material compuesto es la de una fibra. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tensión específica y su elevado módulo específico (Figura 2.1).

En la mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras, las fibras son resistentes, rígidas y ligeras. Si el material compuesto se utilizara a temperaturas elevadas, la fibra también deberá tener una elevada temperatura de fusión. Por tanto la resistencia específica y el módulo específico de la fibra son características importantes:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma_{ts}}{\rho} \quad (4.4)$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad (4.5)$$

Por lo general el módulo específico más alto se presenta en materiales de bajo número atómico y enlaces covalentes, como en el caso del carbono y del boro. Estos dos elementos también tienen alta resistencia y una elevada temperatura de fusión.

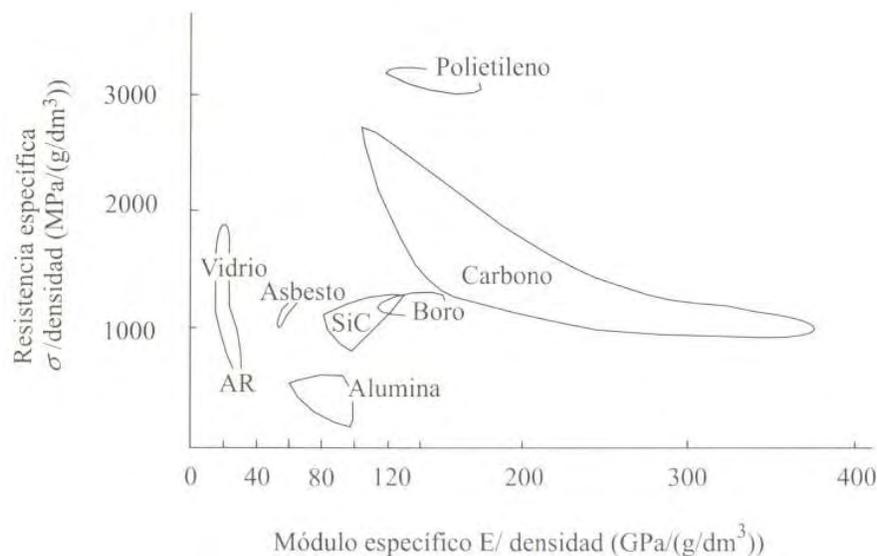


Figura 2.1 Comparación de las características específicas de diferentes fibras.

Las fibras de interés para reforzar materiales deben tener los siguientes atributos: baja densidad, gran resistencia a la tensión, gran módulo de elasticidad y gran flexibilidad. También se deben prestar a la producción en pequeños diámetros. Se han obtenido buenas fibras de metales, cerámicas y polímeros. Los tipos de fibras de refuerzo se pueden clasificar según su origen; las fibras pueden ser de origen mineral y de origen orgánico (tabla 2.2).

TABLA 2.2 Clasificación de las fibras en función de su origen.

Fibras de Origen Mineral	Fibras Cerámicas (Carburo de Silicio, Aramida)
	Fibras Metálicas
	Fibras de origen inorgánico (Carbono, Vidrio, Boro)
Fibras de Origen Orgánico	Aramida, Polietileno

También pueden ser clasificadas en tres categorías generales: a) fibras de carbono, b) fibras inorgánicas y c) fibras poliméricas. A continuación se describirán las características y propiedades de algunas de las fibras más utilizadas en el refuerzo de los materiales compuestos.

TABLA 2.3 Propiedades de varias fibras.

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Temperatura de fusión (°C)
Kevlar-29	1.44	2.8	65	
Kevlar-49	1.44	3.5	125	500
Kevlar-149	1.47	3.4	185	
Spectra 900	0.97	2.6	117	147
Spectra 1000	0.97	3.0	170	
Vidrio E	2.58	3.5	73	<1725
Vidrio S	2.5	4.5	87	<1725
Boro	2.5	3.5	400	2030
Al ₂ O ₃ (FP)	3.9	1.7	350-380	2015
SiC	3.0	3.5	400	2700
Fibras de carbono a partir de PAN	1.7-1.9	1.8-7.1	230-585	3700
Fibras de carbono a partir de asfalto	1.6-1.8	1.4-3.0	41-140	3700
Acero inoxidable	8.0	1.0-1.4	198	
Tungsteno	19.3	4.0	360	3418
Berilio	1.85	1.8	300	1277
Molibdeno	10.2	2.45	310	
Nylon	1.14	0.3-0.8	1-5	249

FIBRAS DE CARBONO

Las fibras de carbono tienen una estructura muy distorsionada y llena de defectos, con estructura parecida a la del grafito. Los átomos dentro de las fibras están unidos mediante enlaces covalentes y por enlaces débiles de van der Waals. El módulo de elasticidad en dirección del eje de la fibra puede ser de hasta de 1000 GPa; en la dirección transversal, es decir, en la dirección perpendicular al eje de la fibra, el módulo puede ser tan pequeño como 35 GPa.

Algunas de las características más representativas de las fibras de carbono son la elevada resistencia específica y rigidez, bajo coeficiente de expansión térmica y baja abrasión, inercia biológica y química, permeabilidad a los rayos X y a las ondas electromagnéticas, resistencia a la fatiga, autolubricación, elevada amortiguación, elevada resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.

Las propiedades mecánicas, químicas, eléctricas y físicas de las fibras de carbono varían mucho, dependiendo de la materia prima y del tratamiento de proceso. La materia prima de las fibras de carbono se llama precursor, y consiste también en una fibra. Si bien prácticamente cualquier fibra se puede transformar en fibra de carbono calentándola, son tres los precursores que principalmente se utilizan en la actualidad para la fabricación de las fibras de carbono: el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase de alquitrán y la celulosa.

El poliacrilonitrilo es el precursor más común utilizado actualmente para obtener fibras de carbono, y generalmente no es poliacrilonitrilo al 100%. Normalmente, es un copolímero que contiene metil acrilato, metil metacrilato, vinil acetato, ácido itacónico, o cloruro de vinilo. Las fibras basadas en el PAN tienen diámetros que oscilan entre los 5 y 7 μm , y aquellas cuyo precursor es el alquitrán están entre las 10 y 12 μm .

Las fibras se estabilizan en el aire a temperaturas de 200 a 300°C mientras están siendo alargadas para inducirles la orientación molecular requerida para alcanzar un alto módulo. Entonces, las fibras estabilizadas son carbonizadas a temperaturas superiores a los 1000°C en nitrógeno. Se puede utilizar un tratamiento térmico con temperaturas hasta los 3000°C para obtener módulos mucho más elevados. El módulo axial de la fibra se incrementa con el tratamiento térmico de temperatura. Los tratamientos térmicos con temperaturas superiores a los 2000°C se llevan a cabo en una atmósfera inerte.

La fibra de carbono es un material muy utilizado en aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de alto módulo como en las de alta resistencia.

Si se desea aumentar la estabilidad a la termooxidación de las fibras de carbono, pueden aplicarse a la fibra recubrimientos resistentes a la oxidación como lo son el óxido de boro o el carburo de silicio. En cambio, si lo que se busca es que puedan soportar temperaturas mucho muy elevadas, se les puede situar en presencia de una atmósfera inerte o en nitrógeno. Para incitar algún tipo de propiedad a las fibras como la conductividad eléctrica, estas pueden ser intercaladas con halógenos y con algunos metales alcalis como el Na, K y Cs.

Las fibras de carbono son anisótropas, y la anisotropía de las fibras se incrementa al aumentar el módulo axial. La estructura de las fibras de carbono de alto módulo obtenidas a partir de alquitrán es altamente gráfica (ordenamiento en forma de láminas), mientras que el ordenamiento en forma de láminas no se observa en las fibras de carbono obtenidas a partir de PAN o rayón. Las fibras de carbono de módulo muy elevado (>800 GPa), se obtienen a partir de la mesofase del alquitrán.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibra de carbono:

- La fibra de carbono de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de carbono de alto resistencia (HS) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.
- La fibra de carbono (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la asistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Todas las fibras de carbono se distinguen por sus características específicas elevadas. Las fibras HM tienen un módulo específico 70 veces superior al de las aleaciones de aluminio. Entre las desventajas que pueden poseer las fibras de carbono se encuentra las siguientes: no presentan plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico, tienen los inconvenientes del coste, la

baja resistencia al impacto de baja energía y las diferencias de potencial que engendran al contacto con los metales, que pueden favorecer corrosiones de tipo galvánico.

TABLA 2.4 Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PAN.

Designación	Alto módulo (HM)	Alta resistencia (HS)	III
Diámetro de hilo (μm)	8	7	7 – 8
Densidad (Kg/m^3)	1740 – 1760	1810 – 1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia a la tensión (GPa)	2.6 – 5	2.1 – 2.7	3.1
Elongación a la rotura (%)	2	0.7	1.1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2.56	2.56	2.56

FIBRAS ORGÁNICAS

Hace unas tres décadas se desarrollaron fibras poliméricas con mucha mayor orientación molecular y sin pliegues de cadena. Esos materiales representaron un gran aumento de resistencia y módulo de elasticidad en comparación con los nylons y poliésteres convencionales utilizados anteriormente, transformando el desarrollo de los materiales compuestos (todos poliméricos) rígidos, resistentes y ligeros. Las fibras orgánicas típicas tienen un diámetro típico entre 10 – 20 μm .

En la categoría de las fibras poliméricas rígidas, las de parafenileno benzobisoxazol (PBO), han recibido gran atención, aunque la mayoría del trabajo reciente se ha realizado sobre las fibras de parafenileno benzobistiazol (PBZT). Las fibras de PBO y PBZT están altamente ordenadas y poseen la estabilidad térmica y módulo a tensión más elevados de cualquier fibra polimérica conocida. La fibra de PBO tiene una temperatura de degradación de más de 600°C en el aire y de más de 700°C en atmósfera inerte. La transición vítrea o temperatura de fundido no se ha observado por debajo de las temperaturas de degradación. Su resistencia al ambiente, a los agentes químicos y a la radiación son también excelentes. Estas fibras se desarrollaron como resultado de una investigación básica llevada a cabo por el Laboratorio de Materiales de las Fuerzas Aéreas (Dayton, OH) en la década de los 70 y la década de los 80. Las fibras de los copoliésteres termotrópicos (por ejemplo, Vectran y Xydar), no estuvieron disponibles comercialmente hasta 1985.

Existen otros dos polímeros a partir de los cuales se pueden producir las fibras orgánicas, estos son la aramida y el polietileno, que pueden ser considerador como los más utilizados para ese propósito.

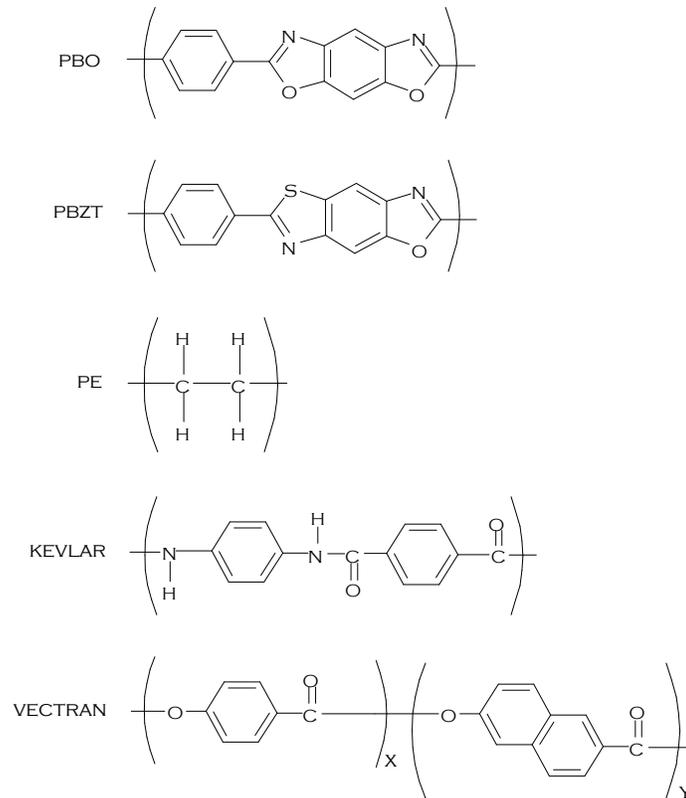


Figura 2.2 Unidades químicas repetitivas de varios polímeros.

ARAMIDA

La aramida es una poliamida aromática del tipo del p – fenileno tereftalamida, con una estructura químicamente perfectamente regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado las moléculas de polímero con las propiedades de una cadena razonablemente rígida.

Según el procedimiento de fabricación, se distinguen dos tipos de fibras de aramida en función de su rigidez:

Fibras de bajo módulo: E = 70 GPa

Fibras de alto módulo: E = 130 GPa

Los materiales compuestos de fibra de aramida se consideran de altas prestaciones, ya que sus características mecánicas son muy elevadas, especialmente la resistencia al impacto. Su punto débil es la resistencia a la compresión.

Las fibras de aramida están disponibles a través de Akzo bajo el nombre comercial de Twaron y a través de Tejin bajo el nombre de comercial de Technora. Las cuatro principales fibras de aramida comercializadas por Dupont son: Kevlar RI, Kevlar 29, Kevlar 49 y Nomex. El Kevlar RI se aplica para el cordaje de refuerzo de neumáticos, el Kevlar 29 se utiliza para vestidos, paracaídas, cuerdas y cables y tiene una alta resistencia y un módulo elástico intermedios. El Kevlar 49 tiene un módulo elástico superior pero la misma resistencia que el Kevlar 29 y es la fibra preferida para los materiales compuestos de elevadas prestaciones. La Nomex es una fibra de la aramida m-fenilenoisoftalamida, y es predominantemente utilizada en recubrimientos de protección contra el fuego.

Las aramidias presentan gran tenacidad, no son frágiles, tienen una alta resistencia al impacto y alta capacidad de absorción de energía. La aramida se degrada a la temperatura de 480°C en el nitrógeno y alrededor de los 380°C en aire. No se funde bajo su temperatura de degradación. Para minimizar el problema de la fotodegradación, los materiales compuestos de fibra de aramida se pueden recubrir por algún material absorbente de luz. Presentan una elevada resistencia específica a la tensión, debido a su alto grado de cristalinidad, las cadenas moleculares son alineadas y hechas rígidas mediante anillos aromáticos con uniones de hidrógeno. Es cinco veces más resistente que el acero.

Son extremadamente resistentes a la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones. Presentan una baja resistencia a compresión y flexión, a diferencia del resto de las fibras que tienen valores similares para la resistencia a la tensión y a compresión. En el rango de temperaturas de estabilidad mecánica, la existencia de humedad puede provocar pérdidas de resistencia de un 10%. Tienen baja adherencia a determinadas matrices, como es el caso de las termoplásticas.

TABLA 2.5 Propiedades del Kevlar 29 y Kevlar 49.

Designación	Kevlar 29	Kevlar 49
Diámetro de hilo (μm)	12	12
Densidad (Kg/m^3)	1440	1450
Módulo de elasticidad (GPa)	60	128
Resistencia a la tensión (GPa)	1.92	2.94 – 3.6
Módulo específico	41	88

POLIETILENO

Al igual que la aramida, la fibra de polietileno, es una fibra orgánica, cuyas propiedades son muy similares. Tienen una densidad muy baja (970 Kg/m^3) y presentan una muy pobre adherencia a la matriz, lo que hace que las propiedades a compresión y a esfuerzo cortante sean muy limitadas. Debido al bajo punto de fusión del polímero del que derivan, las propiedades de esta fibra disminuyen rápidamente con el aumento de la temperatura.

Allied Corporation ha desarrollado fibras de polietileno, Spectra 900 y Spectra 1000, de alto módulo y alta resistencia para aplicaciones de tensión.

TABLA 2.6 Propiedades de las fibras de polietileno, Spectra 900 y Spectra 1000.

DESIGNACIÓN	SPECTRA 900	SPECTRA 1000
ELONGACIÓN A LA ROTURA (%)	3.5	0.7
DENSIDAD (Kg/m^3)	0.97	0.97
MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	117	172
RESISTENCIA A LA TENSIÓN (GPa)	2.6	2.9 – 3.3
MÓDULO ESPECÍFICO	120	177

FIBRA DE VIDRIO

Las fibras de vidrio son el refuerzo más utilizado en la actualidad para la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo costo. Los primeros estudios ingenieriles sobre materiales compuestos fueron realizados sobre materiales compuestos de fibra de vidrio.

Se sabe que a temperaturas lo suficientemente elevadas, el vidrio en general puede ser fibrado. Sin embargo, para realizar esta operación, es necesario centrarse en unas composiciones determinadas. Los vidrios más utilizados son aquellos a base de sílice que contienen en disolución por lo menos a dos silicatos: un silicato alcalino (por ejemplo, silicato de sodio) y uno alcalinotérreo (por ejemplo, silicato de calcio). El óxido de sodio actúa como fundente, facilitando el proceso al bajar la temperatura de fusión de la sílice, así como su viscosidad. Por el contrario, su presencia afecta a la resistencia química del vidrio y por ello se introduce un alcalinotérreo. Los principales tipos de fibras de vidrio son:

- Vidrio E (Eléctrico): representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, de uso general y tiene buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.
- Vidrio A (Alto contenido de álcali): es menos resistente y tiene un módulo más bajo que el vidrio E. Presenta gran resistencia química.
- Vidrio AR (Álcali resistente): es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón o cemento ya que cualquier otro sería atacado por los álcalis liberados en la hidratación del hormigón o cemento.
- Vidrio C (Químico): se sitúa entre el vidrio A y el E y se utiliza en las capas superficiales de estructuras anticorrosión, tienen una alta resistencia química.
- Vidrio R ó S (Resistencia): empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (aeronáutica sobre todo), tienen una resistencia a la tensión y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio.
- Vidrio D (Dieléctrico): con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación, fabricación de radares y ventanas electromagnéticas. Estos materiales presentan muy pequeñas pérdidas eléctricas, por lo que se utiliza como material permeable a las ondas electromagnéticas.
- Vidrio B (Boro): de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido de álcali.
- Vidrio ERC (Eléctrico y Resistente Químico): con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- Vidrio X: con base de Li_2O por su transparencia a rayos X.

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), por ejemplo el vidrio S (25% Al_2O_3 , 10% MgO , y el resto SiO_2),

y el vidrio E (18% CaO, 15% Al₂O₃, y el resto SiO₂). A pesar que son considerablemente más densas que las fibras orgánicas, las fibras de vidrio se pueden utilizar a temperaturas mucho más elevadas.

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Alta adherencia fibra – matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica superior a la del acero.
- Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tienen buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad, materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tienen un bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- Imputrescibilidad (no sufre ninguna alteración). Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- Débil conductividad térmica. La utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de calefacción.
- Excesiva flexibilidad.
- Bajo costo.

TABLA 2.7 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio.

Designación	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (µm)	5 – 13	10 – 20	10	10
Densidad (Kg/m ³)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72.5	86	85
Resistencia a la tensión (GPa)	3.1	3.4	4.59	3.4 – 4.4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°K)	8.6	5	5.1	5

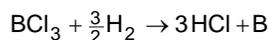
FIBRA DE BORO

El boro está situado en la familia IIIA de la tabla periódica, y sus características son muy diferentes a las de los demás elementos de su grupo (Al, Ga, In, Tl) que son metálicos, presentando analogías mayores con los metaloides (C, Si y Ge). Es semiconductor, duro y su temperatura de fusión es alta. La fabricación de las fibras de boro se inició en la década de 1960. Las fibras de boro se pueden combinar con epoxi, matrices de aluminio y titanio.

Debido a que el boro es quebradizo de por sí, se deposita químicamente sobre otro sustrato. Según el sustrato utilizado para el proceso de fabricación de los filamentos de boro se distinguen dos tipos de fibra de boro:

Fibras de boro obtenidas de la deposición en sustrato de tungsteno (W).

Son las más utilizadas a pesar de que su costo es relativamente alto, esto debido precisamente al elevado costo del sustrato de tungsteno. Se obtiene depositando boro en fase vapor, sobre un alambre de tungsteno. El alambre se calienta eléctricamente en atmósfera de hidrógeno y pasa por una serie de reactores en los que se obtiene boro por descomposición de tricloruro.



Depositándose el boro sobre el alambre. Los filamentos que se obtienen, partiendo de un alambre de tungsteno de 0.012 mm de diámetro son de 0.1 a 0.2 mm de diámetro, quedando el boro bien adherido al tungsteno a través de boruros (WB, W₂B₅) y alcanzando resistencias de rotura a tensión de 3.5 GPa, módulos elásticos de 406 GPa y pesos específicos de 2.6 g/cm³.

Como el proceso de deposición química de vapor, produce frecuentemente defectos superficiales, la superficie de las fibras de boro se pule para eliminarle los defectos, y también se suele recubrir con una capa delgada de SiC con la que se producen esfuerzos superficiales de compresión que pacifican la superficie, Los tratamientos superficiales aumentan en forma considerable la resistencia de las fibras de boro a la fractura; sin embargo, también agregan costo.

Fibras de boro obtenidas de la deposición en sustrato de carbono.

Con la idea de encontrar un sustrato más económico que el tungsteno, se desarrolló un proceso para la deposición del boro en un filamento de carbono. Este tipo de fibra es más económico que el anterior, debido a que el costo del sustrato es menor. Sin embargo, este proceso es bastante complicado ya que durante las primeras etapas de deposición del filamento de boro se presentan unos esfuerzos residuales debidos al crecimiento de las deformaciones de los sustratos. Este crecimiento de las deformaciones puede llegar a superar la deformación a rotura del sustrato de carbono, provocando daños en las superficies internas de los filamentos de boro.

Una posible solución al problema anterior es añadir grafito al sustrato de carbono antes de la aplicación del boro. Con esto solo se consigue la deposición del boro en el sustrato antes de su rotura sino que se previene el daño que pueda sufrir la superficie interna del filamento de boro.

TABLA 2.8 Propiedades de la fibra de boro.

Designación	Boro
Diámetro de hilo (μm)	100 – 140
Densidad (g/cm^3)	2.49 – 2.57
Módulo de elasticidad (GPa)	400
Resistencia a la tensión (GPa)	3.6
Módulo específico	155
Coefficiente de expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)	4.9

FIBRA DE CARBURO DE SILICIO

El carburo de silicio se utiliza generalmente para reforzar aleaciones metálicas de aluminio y titanio, también ha sido utilizado con éxito como refuerzo de matrices y cerámicas. Tiene un costo menos elevado que el boro, y debido a esto se está utilizando en mayor medida que esté como refuerzo de las aleaciones metálicas anteriormente citadas.

Las fibras de carburo de silicio son filamentos de 10 a 15 micras de diámetro. Son muy estables incluso en atmósferas oxidantes. El proceso de producción de las fibras de carburo de silicio es bastante similar al de las fibras de boro. En lugar del tricloro de boro (BCl_3) se utiliza una mezcla de alcalinosilanos. Una de las diferencias con el proceso de obtención del boro es que en este caso existe un paso de reciclado de los polímeros de silano producidos.

Existen tres variaciones de la fibra de SiC , se diferencian en función de las matrices para las que están realizadas:

- SCS – 2, destinada a reforzar matrices de aleaciones de aluminio.
- SCS – 6, destinada a reforzar matrices de aleaciones de titanio.
- SCS – 8, se utiliza para reforzar matrices de aleación de aluminio cuando se requieren mejores propiedades transversales que en el caso de la fibra SCS – 2.

TABLA 2.9 Propiedades de la fibra de carburo de silicio.

Designación	Carburo de Silicio
Diámetro de hilo (μm)	140
Densidad (g/cm^3)	3.0
Módulo de elasticidad (GPa)	400
Resistencia a la tensión (GPa)	2.5 – 3.5
Módulo específico ($\text{GPa m}^3/\text{Kg}$)	155

FIBRA DE CUARZO

Tienen un alto contenido en sílice, SiO_2 , 99.0%. Producidas a partir de cristales de cuarzo natural, los cristales son producidos en forma de barritas, a partir de estos cristales se crean filamentos. Alrededor de 200 filamentos combinados dan lugar a una fibra flexible y con alta resistencia.

Puede ser utilizada con la mayoría de las resinas. La forma industrial más habitual de encontrar estas fibras es en cinta de preimpregnado, aunque también hay tejidos y fibra corta. Tienen una excelente resistencia al choque térmico, es posible calentarlas hasta 1100°C y enfriarlas rápidamente en agua sin ningún cambio. No pueden ser atacadas por ácidos en estado líquido o gaseoso, excepto por los ácidos fosfórico y fluorhídrico.

TABLA 2.10 Propiedades de la fibra de cuarzo.

Designación	Carburo de Silicio
Densidad (g/cm^3)	2.2
Módulo de elasticidad (GPa)	71
Resistencia a la tensión (GPa)	3.45
Elongación a la rotura (%)	1
Módulo específico	32

FIBRAS CERÁMICAS

Las fibras cerámicas se desarrollaron por la necesidad que existía en el sector aeroespacial de refuerzos para altas temperaturas. Existen fibras cerámicas basadas en nitruros, óxidos y carburos.

- Fibras con Al_2O_3 , presentan alto módulo de elasticidad, alto punto de fusión y una excepcional resistencia a ambientes corrosivos. La forma comercial con mayor porcentaje de Al_2O_3 , un 99.0%, es la fibra FP de DuPont, cuya resistencia es de 1.38 GPa y su módulo de elasticidad es 380 GPa. Existe una variante de la fibra FP, esta es recubierta con una capa de sílice, con lo que aumenta su resistencia hasta los 1.9 GPa.
- Fibras con $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$, son las fibras más avanzadas de todas las fibras policristalinas disponibles comercialmente. En función del porcentaje de cada componente existen diversos tipos de fibra. Las resistencias de estas fibras oscila entre los 1.3 y los 2.25 GPa, los módulos de elasticidad oscilan entre los 150 y 250 GPa. Al igual que las anteriores presentan una extraordinaria resistencia a ambientes corrosivos.

- Fibras con $ZrO_2 - SiO_2$, su propiedad característica es su resistencia a la penetración de llama, presenta un módulo de elasticidad de 76 GPa, inferior al de la mayoría de las fibras cerámicas.

TABLA 2.11 Propiedades de la fibra de cuarzo.

Designación	Composición (%)	Densidad (g/cm^3)	Diámetro de hilo (μm)	Resistencia a la tensión (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
FP	99.9 Al_2O_3	3.95	20	1.38	379
Nextel 312 (continua)	62 Al_2O_3 14 B_2O_3 24 SiO_2	2.7	11	1.72	155
Nextel 440 (continua)	70 Al_2O_3 2 B_2O_3 28 SiO_2	3.05	11	2.07	193
Fiberfrax (discontinua)	51.9 Al_2O_3 47.9 SiO_2	2.73	2 – 3	1.9	100
Saffil grado RG (discontinua)	96–97 Al_2O_3 3–4 SiO_2	3.3 – 3.5	3	1 – 2	297
Silar SC-9 (80–90 %, whisker)	SiC	3.2	0.6	6.9	690
Tyranno Si – Ti – C (discontinua)	44 Si 12.3 O 24.5 C 11 Ti	2.3	10 – 15	1.99	117

FIBRAS METÁLICAS

Se pueden usar varios metales para obtener alambres de alta resistencia que funcionen como fibras metálicas. Los casos más notables son las de las aleaciones de berilio, que tienen gran resistencia, gran módulo de elasticidad y baja densidad, y también el caso del acero y el del tungsteno. Las resistencias de las fibras metálicas son consistentes y reproducibles.

Tienen la desventaja de su densidad y costo, pues salvo el acero, son todas más caras que la fibra de vidrio. Pueden obtenerse mediante técnicas diferentes, como laminado trefilado o proyección del líquido. Se aplican generalmente con matrices metálicas. Las principales fibras metálicas son:

- Hierro y aleaciones. Alta resistencia y módulo elástico. Ferromagnéticos.
- Aceros inoxidable. Resistencia a la corrosión.

- Superaleaciones de níquel y cobalto. Resistencia mecánica y química a altas temperaturas.
- Titanio, tantalio, níquel, refractarios. Resistencia a la corrosión. Alto punto de fusión.
- Cobre y aleaciones. Conductividad eléctrica y térmica.
- Aluminio y aleaciones. Baja densidad, conductor eléctrico y térmico.
- Plata, oro, metales preciosos. Conductor térmico y eléctrico. No se corroen.

2.2. MATRICES.

Al igual que las fibras, los materiales de matriz pueden ser polímeros, cerámicas o metales. También se usa el carbono como material de matriz, reforzado con fibras de carbono, en una clase de materiales llamados materiales compuestos carbono-carbono. Las funciones principales de los materiales de matriz son suministrar soporte a las fibras y mantenerlas en su posición, transferir la carga a las fibras fuertes, proteger a las fibras contra daños durante su manufactura y uso en el material compuesto y evitar la propagación de las grietas en las fibras hacia todo el material compuesto. Las grietas que se han propagado a través de una fibra frágil se detienen cuando sus puntas se encuentran con los materiales de matriz, que son relativamente más tenaces. La matriz, por lo general, es la que aporta el control principal sobre las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas de un material compuesto.

Los diferentes tipos de matrices utilizadas en los materiales compuestos, se pueden clasificar en dos tipos de matrices: matrices orgánicas y matrices inorgánicas. Como ejemplos de las matrices orgánicas podemos mencionar las siguientes matrices: epoxi, poliéster, polietileno, polipropileno, fenólica. Forman parte de las matrices inorgánicas el carbono, cemento, geopolímeros, matrices cerámicas, matrices metales, yeso.

Los materiales compuestos de matriz metálica incluyen aluminio, magnesio, cobre níquel y aleaciones compuestas intermetálicas reforzadas con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los materiales compuestos de matriz metálica, se satisface una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. La matriz de metal permite que el material compuesto funcione a altas temperaturas, pero a veces la producción del material compuesto es más difícil y más costosa que la producción de los materiales con matriz polimérica.

TABLA 2.12 Clasificación de diferentes matrices utilizadas en materiales compuestos.

Inorgánicas	cemento, geopolímeros, yeso Matrices cerámicas Matrices metálicas	
Orgánicas	termoestables	epoxi, viniléster, poliéster, fenólica, esteres cianato, bismaleimidias, poliimidias, polieteramida
	termoplásticas	policloruro de vinilo (pvc), copolímeros de estireno (abs, san), polietileno (pe), polipropileno (pp), policarbonato (pc), polimetacrilato de metilo (pmma), acetato, poliestireno (ps), polioximetileno (pom), pbt, polieterimida, pet, nylon, poliamida, peek, pekk, pai, pas

Los materiales compuestos con matriz cerámica tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas y son de menor peso que los materiales compuestos de matriz metálica para alta temperatura. Los materiales que tienen matriz de cerámica, como por ejemplo el concreto reforzado, se usan en aplicaciones de cargas de compresión, o bien se contrarresta el comportamiento frágil adaptando con cuidado las propiedades de interfase.

Las matrices orgánicas, en general, son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos de base. En estos tipos de materiales compuestos, son típicos los materiales compuestos de moldeo de láminas (SMC, sheet-molding compounds) y los materiales compuestos de moldeo en volumen (BMC, bulk-molding compounds).

Las matrices orgánicas (o poliméricas) pueden ser subdivididas en termoestables y termoplásticas. Los polímeros llamados termoplásticos son aquellos que se funden o plastifican con un suministro de calor, es decir, con un incremento de temperatura. Son macromoléculas que están unidas por fuerzas de diversa intensidad; así, cuando sean de baja intensidad, podremos superarlas con un simple calentamiento dando lugar al plástico fundido.

Cuando las fuerzas de unión de estos filamentos entre sí son tan intensas que llegan a igualar a las fuerzas de construcción de ellos mismos, se romperán antes de separarse, lo que implica que al incrementar la temperatura no podrán cambiar de estado sólido a líquido, denominando a estos polímeros termoendurecibles o termoestables.

El tipo de resina más importante utilizado en materiales compuestos son las resinas líquidas termoestables, algunas veces llamadas químico estables. Las resinas termoestables son líquidas a temperatura ambiente y deben curarse para alcanzar el estado sólido. Esto se puede llevar a cabo por medios químicos a temperatura ambiente, mediante calentamiento a elevada temperatura, o mediante diferentes tipos de radiación como las radiaciones ultravioleta, haz de electrones, rayos gamma y microondas. Una vez curada, la resina líquida se convierte en un sólido duro con eslabones químicos en cruz, lo que produce una red tridimensional tirante de cadenas de polímero. A diferencia de los termoplásticos, esta reacción es irreversible y el polímero no puede ser reciclado; no pueden volverse a fundir sin sufrir una seria degradación, además generalmente, son insolubles. Sin embargo pueden ser atacadas por solventes y algunos agentes químicos (incluso el agua), especialmente a alta temperatura, que les puede provocar un ablandamiento, estrechamiento y reducción de la temperatura de transición vítrea (T_g).

Algunas resinas termoestables, especialmente aquellas con las mejores prestaciones a elevadas temperaturas, son sólidas o virtualmente sólidas a temperatura ambiente en su estado antes del curado. Estas resinas deben ser primero convertidas a líquido mediante calentamiento o mediante el uso de algún solvente de manera que pueda ser impregnada y se pueda consolidar el refuerzo (fibras) para posteriormente se cure por calentamiento a una temperatura más elevada. Uno de los factores críticos en las prestaciones de todas las matrices resinosas es la máxima temperatura a la que pueden ser utilizadas en condiciones de servicio. Este valor normalmente viene caracterizado por la temperatura de transición vítrea (T_g) o por la temperatura de distorsión (HDT).

También se tienen en cuenta las resinas termoplásticas, éstas, por definición, son sólidas a temperatura ambiente y se debe aumentar su temperatura hasta el estado líquido cuando se van a utilizar en cualquier proceso. Aparte del cambio de estado de sólido a líquido y viceversa, no sufren cambio químico y el ciclo de fundición-solidificación se puede repetir indefinidamente.

Las resinas termoplásticas pueden ser amorfas o parcialmente cristalinas. Las últimas suelen tener una HDT superior y mayor resistencia a los solventes. Las resinas termoestables son siempre amorfas pero difieren bastante en su T_g y en la resistencia al ataque de solventes.

El proceso de polimerización para termoestables tiene generalmente dos etapas, la primera en la planta química, donde las moléculas se polimerizan parcialmente formando cadenas lineales, y la segunda en la planta de producción de piezas, donde el entrecruzamiento se completa bajo el calor y la presión de moldeo.

TABLA 2.13 Propiedades características de algunos materiales de matriz.

Material	Densidad (g/cm³)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Coefficiente de dilatación térmica (10⁻⁶/°C)
Epóxicas	1.05 – 1.35	2.8 – 4.5	55 – 130	30 – 45
Poliéster	1.12 – 1.46	2 – 4.4	30 – 70	40 – 60
Cobre	8.9	120	400	16.5
Acero inoxidable	8.0	198	700 – 1000	18
Aleaciones de aluminio de alta resistencia	2.7	70	250 – 480	23.6
Magnesia (MgO)	3.6	210 – 310	97 – 130	13.8
Aluminosilicato de litio (vitrocerámica)	2.0	100	100 – 150	1.5
Carburo de silicio	3.2	400 – 440	310	4.8

El curado es importante para alcanzar las propiedades óptimas del polímero. Muchos termoestables pueden polimerizar a temperatura ambiente pero el material suele ser expuesto a una temperatura relativamente alta en un curado final destinado a minimizar cualquier curado posterior y cambios de propiedades durante la vida en servicio.

Las tensiones de contracción durante el proceso de polimerización, que es una reacción exotérmica, y las tensiones térmicas provocadas por las diferencias entre el coeficiente térmico de expansión de la matriz y la fibra pueden afectar a las microtensiones propias de los materiales compuestos; estas tensiones se añaden a las desarrolladas por la carga externa. Las tensiones producidas por la contracción del polímero pueden ser suficientes para producir microfisuras incluso en ausencia de carga externa.

INTERFASE FIBRA – MATRIZ.

Los refuerzos deben estar fuertemente unidos a la matriz, de forma que su resistencia y rigidez sea transmitida al material compuesto. El comportamiento a fractura también depende de la resistencia de la interfase. Una interfase débil da como resultado un material con baja rigidez y resistencia pero

alta resistencia a la fractura mientras que una interfase fuerte resulta en un material rígido y resistente pero con una frágil resistencia a la fractura.

La unión de la interfase tendrá lugar una vez que la matriz haya impregnado el refuerzo. La impregnabilidad puede definirse como la capacidad de un líquido para extenderse por una superficie sólida. Pueden darse distintos tipos de unión para un mismo sistema.

Unión mecánica: Esta unión es efectiva cuando la fuerza se aplica paralela a la superficie (esfuerzos cortantes). Sin embargo, será poco efectiva para esfuerzos a tensión, a no ser que exista un gran número de irregularidades en la superficie (A en la figura 2.3). Cuanto más rugosa sea la superficie más efectiva es la unión.

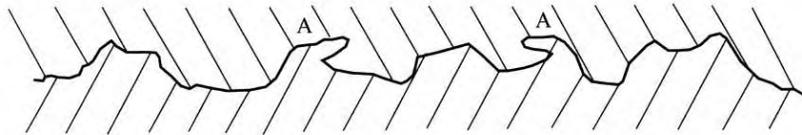


Figura 2.3 Unión mecánica.

Unión electrostática: La unión entre refuerzos y matriz ocurre cuando una superficie está cargada positivamente y la otra negativamente. Estas uniones son únicamente efectivas en distancias pequeñas, del orden de átomos.

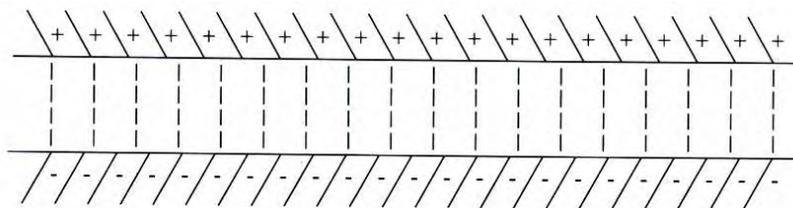


Figura 2.4 Unión electrostáticas.

Unión química: Puede estar formada por entre grupos químicos en la superficie del refuerzo (X en la figura 2.5) y grupos químicos compatibles en la matriz (R en la figura 2.5). La resistencia de la unión depende del número de uniones por unidad de área. Para este tipo de uniones pueden utilizarse agentes aparentes. Por ejemplo, para unir grupos óxidos en una superficie de vidrio y moléculas de una matriz polimérica se utiliza silanos.

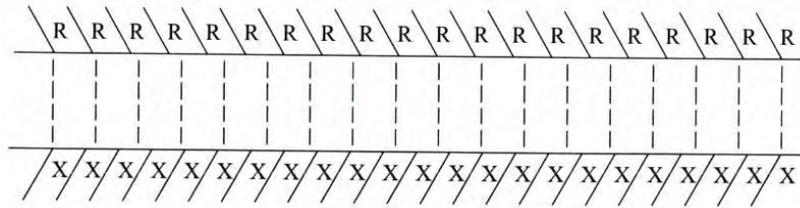


Figura 2.5 Unión química.

Unión mediante reacción o interdifusión: Los átomos o moléculas de los componentes del material compuesto pueden difundirse en la interfase para dar lugar a este tipo de unión. Para interfases en las que estén involucrados polímeros, este tipo de unión puede considerarse como un entrelazado entre moléculas. Para sistemas en los que estén involucrados metales y cerámicas la difusión de componentes de ambos materiales puede dar lugar a una frontera en la interfase de diferente estructura y composición que los componentes.

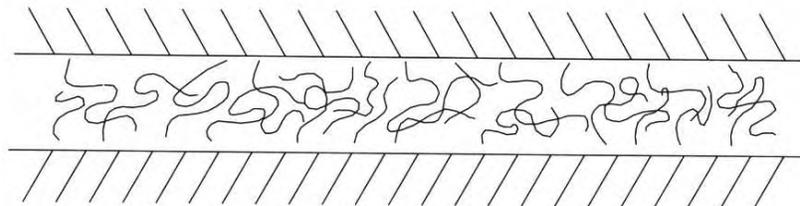


Figura 2.6 Unión mediante interdifusión en polímeros.



Figura 2.7 Unión mediante interdifusión en metales y cerámicas.

2.3. CARGAS Y ADITIVOS.

En la industria de los materiales compuestos se utilizan diferentes productos que pueden ser incorporados al material compuesto fibra-resina para aportar al material características particulares o reducir el coste del mismo. La cantidad de productos añadidos es variable según se trate de cargas o aditivos.

CARGAS

Podemos dividir las cargas en dos grandes grupos, cargas reforzantes y cargas no reforzantes, en las que se busca sobre todo la disminución del costo global del material compuesto. Entre las cargas más utilizadas son las microesferas de vidrio, cuyo interés principal reside en su geometría que reparte regularmente los esfuerzos en las piezas, evitando de esta forma las concentraciones de tensiones. Las microesferas pueden ser huecas o macizas, y su diámetro está comprendido generalmente entre 10 y 150 micras y pueden incluso recibir un tratamiento tipo ensimaje para aumentar su unión a las resinas.

En algunos casos concretos pueden utilizarse otros tipos de microesferas de diferente naturaleza, con características superiores a las de vidrio, pero sensiblemente más caras

- Microesferas huecas de carbono, con una densidad de 120 Kg/m^3 y un diámetro comprendido entre 5 y 150 micras.
- Microesferas huecas orgánicas (epoxi, fenólicas, poliestireno, o cloruro de vinil/acrilonitrilo), con una densidad de 100 a 500 Kg/m^3 y unos diámetros comprendidos entre 10 y 800 micras, con unas prestaciones sensiblemente inferiores.
- Microesferas macizas, ya sean de vidrio u otros materiales sintéticos, que tienen mayor densidad, pero cuyo precio es menor y pueden incorporarse a formulaciones destinadas a moldeo de altas presiones.

Entre las cargas no reforzantes, las más utilizadas son en general de origen mineral y se incorporan a la resina en proporciones compatibles con las características buscadas y el precio, que generalmente es bajo, debido a que estas cargas son simplemente extractos de rocas minerales.

Las más utilizadas son las siguientes:

- Carbonatos: carbonato de calcio (el más utilizado), carbonato doble de calcio y magnesio (dolomía)
- Silicatos: Silicato de magnesio hidratado (talco), silicato de alúmina hidratado (caolín), silicato de alúmina anhídrido (feldespato), silicato de calcio (wollastonita).
- Sílices: Cristalina, microcristalina, amorfa.

- Cargas ignifugas: Hidrato de aluminio, óxido de antimonio, boratos de zinc, productos orgánicos variados.
- Cargas conductoras (de la electricidad o del calor): Polvos metálicos (Al, Cu, Ni, Ag, Fe...), microesferas metalizadas, negro de humo, filamentos metálicos muy finos.

ADITIVOS

Además de los sistemas catalíticos, necesarios para conseguir el endurecimiento de las resinas termoestables, es necesario utilizar una serie de productos, siempre en menores cantidades que las cargas.

- Lubrificantes: Lubrificante interno, lubricante externo (agente de desmoldeo). El primero modifica las fuerzas de cohesión intermoleculares, disminuyendo la viscosidad de la resina sin alterar sus propiedades. El segundo aflora a la superficie de la resina para reducir su tendencia a pegarse a los moldes.
- Pigmentos: Preparados a partir de productos insolubles, en forma sólida, de origen mineral u orgánico.
- Colorantes: Compuestos solubles en agua o disolvente orgánico, que se utilizan poco debido a su mala resistencia química y térmica.
- Pastas colorantes: Son dispersiones de pigmentos en un soporte pastoso, de fácil incorporación y dispersión en la resina.
- Agentes anti-retracción: Se utilizan para conseguir mejores calidades de acabado superficial, sobre todo en las piezas moldeadas en caliente.
- Aditivos anti-ultravioleta: Su función es la de proteger el material compuesto de las acciones de los rayos ultravioleta, que son los más energéticos del espectro de los rayos solares y deterioran el material según diversos mecanismos.

Para el conjunto de pigmentos y colorantes, deben observarse una serie de factores antes de su elección tales como: compatibilidad con la resina, resistencia química, propiedades ópticas, estabilidad térmica, resistencia a la migración, resistencia a los rayos ultravioleta, facilidad de dispersión, propiedades eléctricas, toxicidad y costo.

2.4. ADHESIVOS ESTRUCTURALES.

Los adhesivos estructurales son utilizados en combinación con un material estructural, y trabaja de modo que la junta o línea de encolado no falle cuando el material trabaje a tensiones de hasta su límite elástico y permita que la estructura trabaje según requerimientos mecánicos y físicos. En general se trata de adhesivos formados por dos polímeros, uno termoestable (modificado o no) y otro termoplástico incluyendo ciertos elastómeros. Se utilizan sobre todo en estructuras tipo sándwich.

Atendiendo a un criterio resistente puramente numérico resulta difícil encontrar la frontera entre adhesivo estructural y no estructural, pudiendo definirse como estructural aquel que supere a temperatura ambiente los 10 MPa de resistencia a la tensión.

Entre los adhesivos estructurales más utilizados se encuentran los de base epoxídica, derivados de las resinas de poliéster, neopreno-fenólico, nitrilo-fenólico, epoxi-fenólico, nylon-epoxi y caucho-fenólico.

- **Acrilatos:** Líquidos, dos componentes que se aplican por separado sobre las superficies a unir. Endurece en 3–4 minutos. El 60–70% de su resistencia total se adquiere a los 15–30 minutos de aplicado.
- **Cianoacrilatos:** Son líquidos de endurecimiento ultrarrápido formados por un solo componente. Estables a temperatura ambiente. Han de ser extendidos en capa muy delgada, al así hacerlo el inhibidor escapa y el monómero se transforma en polímero. Deben ser aplicados sobre superficies muy lisas y ajustadas, de modo que no sirven para superficies en las que deban realizar una función de relleno. No dan buenos resultados en materiales porosos.
- **Anaeróbicos:** Son líquidos en presencia del oxígeno del aire y endurecen en ausencia del mismo. Al igual que los cianoacrilatos son de endurecimiento muy rápido.

- Resinas fenólicas: Los adhesivos a base de resinas fenólicas proporcionan buenos valores de cortadura (hasta 40 MPa), pero presentan alta contracción durante el curado y tienen baja resistencia al pelado, al impacto y son frágiles, por lo que en general van asociados con un elastómero o un termoplástico para mejorar estas propiedades. Se une con los siguientes polímeros:
 - Vinil-fenólicas: Las resinas de polivinilformol ó polivinilbutilol copolimerizan con la resina fenólica cuyo porcentaje es directamente proporcional a la resistencia térmica y al pelado. Tienen buena resistencia al impacto, aceites, combustibles aromáticos, atmósferas salinas, etc. Las mayores desventajas que presentan son la necesidad de altas temperaturas y presiones para curar.
 - Nitrilo-fenólicas: Son mezclas de acrilonitrilo y novolacas. Si bien tienen propiedades mecánicas medias, son las de mayor durabilidad.
 - Epoxi-fenólicas: Resisten temperaturas de hasta 275°C. Sin embargo, a temperatura ambiente son relativamente rígidas con poca resistencia al pelado.

El principal inconveniente de este tipo de resinas está en que liberan agua durante el curado, lo que exige la aplicación de altas presiones para mantener en contacto las superficies a unir. Es la resina más ampliamente utilizada en la fabricación de laminados de madera y en la unión de metal-madera. Tienen también utilidades en la unión de combinaciones de vidrio, metal, caucho, madera y otros materiales.

- Resinas epoxi: Se presentan comercialmente en forma sólida, líquida, pasta o films, y dentro de cada grupo, existen de endurecimiento en caliente con aporte de calor y de endurecimiento a temperatura ambiente. Se trata de adhesivos que pueden realizar la función de relleno de material entre las superficies de los materiales a unir. En general pueden activarse con ciertos productos para mejorar su resistencia química, a altas temperaturas, etc.
- Nitrilo-epoxi: Son sistemas monocomponentes de durabilidad intermedia entre los epoxi comunes y los adhesivos de base fenólica. Son muy caros pero presentan excelentes propiedades.
- Nylon-epoxi: Tienen muy buenas propiedades mecánicas pero se degradan con la humedad.
- Poliuretanos: Son adhesivos bicomponentes, aunque existen una variedad de monocomponentes elásticos de curado con calor e incluso a temperatura ambiente en presencia de aire. Su principal

aplicación radica en el pegado de perfiles plásticos o metálicos entre los que se requiera una unión relativamente elástica, con suficiente superficie de pegado, y que pueda soportar vibraciones. Son adhesivos que permiten adherir superficies porosas o irregulares entre las que deba hacerse una función de llenado o acoplamiento. Estos adhesivos trabajan bien desde temperaturas bajas hasta unos 80°C, pero no poseen elevada resistencia química o frente a radiaciones tales como la ultravioleta.

TABLA 2.14 Aplicaciones de los principales adhesivos estructurales.

ADHESIVO	SUSTRATO						
	metal/metal	metal/madera	madera/madera	metal/ caucho	caucho/ caucho	metal/ fenol	fenol/ fenol
FF – PVA		•			•	•	
FF – PVB	•	•				•	•
FF – PVF	•	•		•		•	•
FF – PA	•	•					
FF– NEOPRENO		•		•	•	•	
FF–NITRILO	•	•	•	•	•	•	•
FF	•	•	•				
RESORCINA–F			•				
FF–EPOXI	•	•				•	•
EPOXI	•	•				•	•
UF			•				
MF			•				
		Abreviaturas:					
		FF	Resina de formaldehído				
		PVA	Acetato de polivinilo				
		PVB	Polivinil – butiral				
		PVF	Polivinil – formal				
		PA	Poliamida				
		UF	Resina de urea – formaldehído				
		MF	Resina de melamina – formaldehído				

2.5. RECUBRIMIENTOS.

El diseño y color de las piezas de materiales compuestos son dos conceptos estrechamente vinculados. Igualmente la protección de la superficie, junto con un buen acabado de la misma son exigencias que la mayoría de los fabricantes ponen en sus productos.

Normalmente, los gel coats o capas superficiales de resina son suficientes para resolver la mayoría de los problemas medio-ambientales (ataques químicos, agua y humedad).

Sin embargo, cuando el material compuesto está sometido a abrasión o altas temperaturas, lo más eficiente es ejecutar la pieza de materiales compuestos como si no hubiera tal requerimiento y posteriormente añadir el recubrimiento adecuado. A continuación se presentan los tipos de recubrimientos más usuales.

TABLA 2.15 Recubrimientos disponibles.

Tipo de recubrimiento	Sistema
Ambientales	Gel – coat
Abrasión	Metálicos
	Cerámicos
	Fenólicos
	Epoxi/arena
	Termoplásticos
Fuego	Tejidos cerámicos
	Pinturas intumescentes
	Mats endotérmicos
	Mats de vidrio
	Mats intumescentes
	Sistemas híbridos cerámicos/intumescentes
Químicos	PVC
	Polipropileno
	PVDF
	PTFE
	polietileno

2.6. MATERIALES PARA ESTRUCTURAS TIPO SANDWICH.

Las estructuras tipo sándwich son una de las principales construcciones en el área de materiales compuestos. Una estructura tipo sándwich está compuesta principalmente de tres elementos: 1) Las capas de un material de recubrimiento, que están generalmente compuestas por unas láminas delgadas y resistentes, generalmente con mejores propiedades que el resto de componentes. 2) El núcleo del sándwich o relleno, que es generalmente un material ligero cuya función principal es separar las capas y transmitir los esfuerzos cortantes de una capa a la otra. 3) La interfase de unión entre las capas y el núcleo, que tiene como objeto mantener unidos el núcleo y las capas. Ni el núcleo ni el material de recubrimiento son materiales rígidos o resistentes, pero el material compuesto sí tienen ambas propiedades. Un ejemplo familiar es el cartón corrugado. Un núcleo corrugado de papel se une por

ambos lados a un papel liso y grueso. Ni el núcleo corrugado ni el papel de recubrimiento son rígidos, pero la combinación sí lo es.

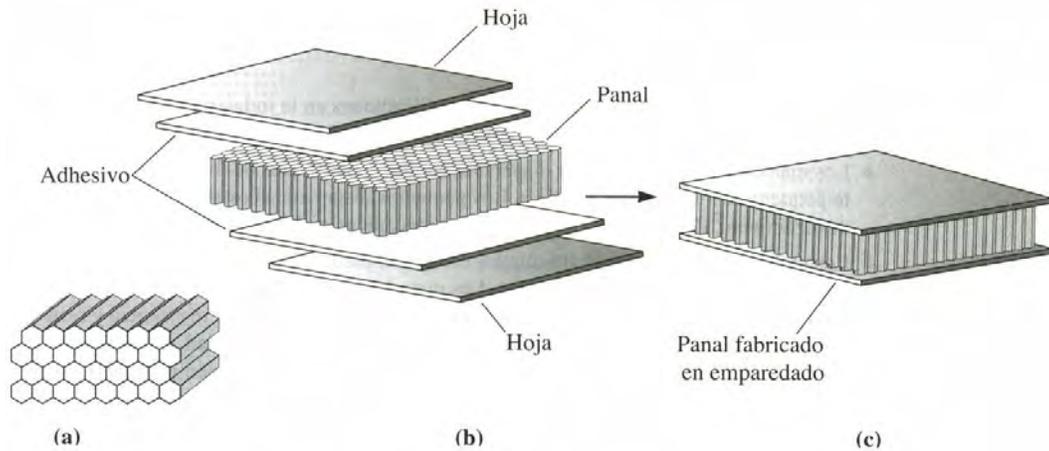


Figura 2.8 (a) Núcleo en forma de panal de celdas hexagonales, (b) que se pueden unir a dos hojas mediante capas de adhesivo y que (c) producen una estructura tipo sándwich excepcionalmente ligera, aunque rígida y fuerte.

Existen muchos tipos de rellenos de estructuras tipo sándwich, un ejemplo importante es la estructura en panal. El núcleo en panal se realiza a partir de láminas delgadas de diversos materiales metálicos y no metálicos cuyas propiedades, unidas al espesor de la lámina, la forma y tamaño de la celdilla formada, pueden variarse considerablemente y conducir a productos con un amplio margen de densidades, resistencias, etc.

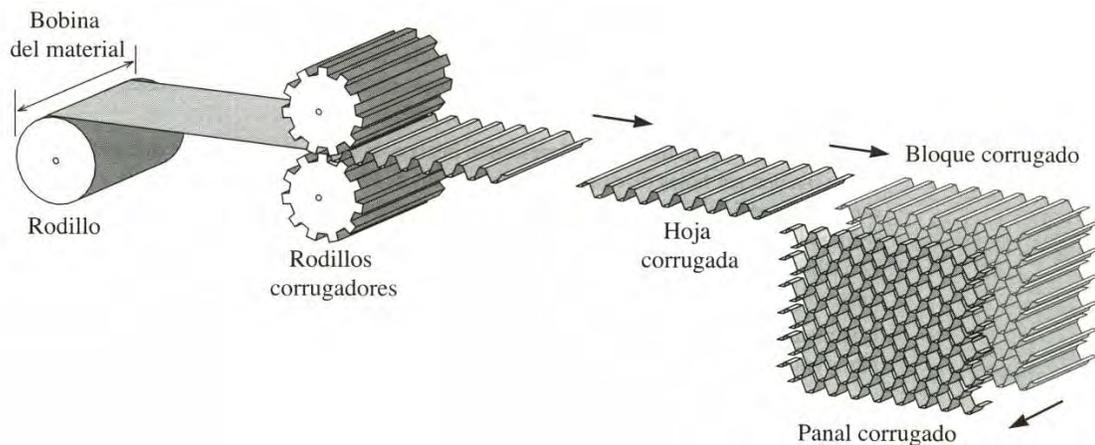


Figura 2.9 En el método por corrugación para producir un núcleo en panal, el material (por ejemplo aluminio) se corruga entre dos rodillos. Las hojas corrugadas se unen entre sí con un adhesivo y después se cortan al espesor deseado.

Las láminas se unen entre sí mediante adhesivos de distintos tipos o por soldadura, formando estructuras por lo general regulares y repetitivas a base de un conjunto de prismas rectos de lados comunes en forma de “panal” y con la celdilla básica de sección transversal dada, en función de la aplicación del núcleo, siendo la más común la forma hexagonal, aunque, estas pueden ser de formas cuadradas, rectangulares o senoidales y se pueden fabricar de aleaciones de aluminio, acero, titanio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramidas, nomex, kevlar y otros materiales.

Las celdas de panal se pueden rellenar con espumas o fibras de vidrio para lograr una excelente absorción de sonidos y vibraciones. Las mismas espumas pueden utilizarse como núcleo de las estructuras tipo sándwich. En la tabla 2.16 se muestran las propiedades de algunos de estos materiales. Las espumas son dispersiones de grandes volúmenes de gas en pequeños volúmenes líquidos con burbujas que crecen mucho, quedando muy cerca unas de otras, deformándose y adoptando formas casi poliédricas, con delgadas capas de líquido entre ellas, líquido que solidifica constituyéndose las espumas denominadas poliédricas.

TABLA 2.16 Propiedades de varios materiales de espuma utilizados como núcleos.

Tipo	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a compresión a 10% de flexión. (MPa)	Temperatura máxima de servicio (°C)	Conductividad térmica (W/m °K)
ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno)	641 – 897	13.8 – 27.6	15.8 – 25.5	80 – 82	0.08 – 0.3
Acetato de celulosa	96 – 128	1,2	0.86	177	0.04
Epoxis	80 160 320	0.35 1.2 4.5	0.62 1.8 7.4	177 177 177	0.04 0.04 0.05
Fenólicas	5 – 24 32 – 80 112 – 160	0.021 – 0.12 0.138 – 0.372 0.552 – 0.896	0.014 – 0.1 0.15 – 0.58 1.09 – 2.07	145 145 145	0.03 – 0.04 0.03 – 0.04 0.03 – 0.04
Polycarbonato	801	37.9	51.7	132	0.15
Polipropileno	561	11.03	14.4	—	0.61
Poliuretano	21 – 48 64 – 128 144 – 192 208 – 288 304 – 400	0.10 – 0.65 0.62 – 1.99 1.58 – 3.10 3.28 – 4.83 5.34 – 8.96	0.1 – 0.41 0.48 – 1.9 1.99 – 3.79 4.48 – 7.58 8.27 – 13.8	82 – 121 93 – 131 121 – 135 121 – 149 121 – 149	0.2 – 0.4 0.02 – 0.04 0.03 – 0.05 0.04 – 0.06 0.05 – 0.07
Moldeado de pieles	400 – 1041 48 – 481	0.68 – 18.6	0.28 – 20.7	66 – 121 66 – 121	0.02 – 0.12
Policloruro de vinilo	48 96	6, 9 y superior	0.65 1.38	—	—

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

La selección del material y del proceso para desarrollar un producto es un paso importante en el proceso de diseño. Como la selección de materiales también determina en parte el proceso de fabricación, un proceso de diseño eficiente debe de tomar en cuenta la selección simultánea de material y proceso de fabricación. Tanto las propiedades (físicas, químicas, eléctricas, mecánicas y térmicas) de los materiales como su costo varían mucho de un material a otro; por lo tanto, es importante conocer las características del material y su proceso de fabricación, para acelerar el proceso de selección del material. En la tabla 3.1 se muestra una lista de las propiedades que se suelen considerar para la selección de un material.

TABLA 3.1 Lista de propiedades que se suelen considerar para la selección de un material.

Propiedades Físicas	Propiedades Mecánicas
Punto de fusión	Dureza
Densidad	Módulo de elasticidad
Viscosidad	Módulo de Poisson
Reflectividad	Resistencia a la tensión
Transparencia	Resistencia a la cedencia
Propiedades Químicas	Porcentaje de alargamiento
Resistencia a la corrosión	Resistencia al impacto
Resistencia a la oxidación	Límite de fatiga
Resistencia a la radiación ultravioleta	Resistencia a la flexión
Resistencia a varias sustancias	Resistencia a la compresión
Propiedades Eléctricas	Resistencia a la deformación por termofluencia
Conductividad	
Constante dieléctrica	
Propiedades Térmicas	
Conductividad térmica	
Coefficiente de dilatación térmica	
Calor específico	

Como ya hemos mencionado, es de suma importancia conocer las propiedades y el tipo de proceso que se utilizara para la fabricación de un material. En lo referente a las propiedades químicas, físicas, térmicas y eléctricas de los materiales, estas se pueden consultar en distintas bases de datos;

existen bases de datos desarrolladas por organizaciones gubernamentales, como la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration, por sus siglas en inglés). Las sociedades profesionales como la ASM Internacional y la Sociedad Estadounidense para Prueba de Materiales (ASTM) tienen datos sobre materiales y los compilan en bases de datos. También los propios vendedores de materiales son una fuente importante de datos sobre propiedades de sus productos. En el presente capítulo abordaremos algunos procesos utilizados en la manufactura tanto de fibras de refuerzo como de materiales compuestos.

3.1. FABRICACIÓN DE FIBRAS.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, se suelen utilizar fibras como materiales de refuerzo en los materiales compuestos, debido a su gran resistencia y módulo de elasticidad, o para transmitir señales ópticas. Las fibras orgánicas se caracterizan por su baja densidad de masa. Se producen en formas continuas, interrumpidas o filiformes cuyos diámetros van de 5 μ m a 1mm. Los diámetros pequeños son necesarios para reducir las imperfecciones al mínimo, para así alcanzar un gran porcentaje de la resistencia teórica del material. También, los diámetros pequeños aseguran gran flexibilidad para devanar en bobinas y mantener la integridad cuando en el uso se presentan cambios bruscos de dirección. En esta sección se abordarán las técnicas de formación de fibras artificiales, como las de polímeros, vidrio de óxido, cerámica cristalina y otras de alto rendimiento para las aplicaciones de los materiales compuestos.

3.1.1. HILADO DE FUNDIDO.

El hilado de fundido es un proceso económico para producir fibras de polímero y de vidrio. Entre los ejemplos característicos de fibras de polímero hiladas fundidas están el poliéster, el nylon y las poliolefinas. Como el enlace covalente carbono-carbono es muy fuerte, cabe esperar que los polímeros de cadena lineal tengan gran resistencia, siempre y cuando la cadena molecular se pueda alinear en dirección del eje de la fibra. Estas propiedades se pueden alcanzar con el proceso de hilado de fundido.

El extremo final de un sistema de hilado de fundido es normalmente un extrusor. Después, el fundido pasa por una tobera para hilar que tiene varios agujeros circulares. El líquido viscoso se hila desde quizá 400 hasta 25 μ m de diámetro, y la fibra que resulta está muy orientada y se devana en una bobina. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de un aparato de hilado de fundido con el que se forman fibras continuas.

La técnica más frecuente para formar fibras de vidrio también es hilado de fundido. Aunque las temperaturas que se usan son mayores, la técnica se parece a la que se describió para los polímeros, con una excepción notable: no se requiere un extrusor. El fundido caliente y viscoso simplemente se prensa y se hace pasar por los agujeros de la tobera.

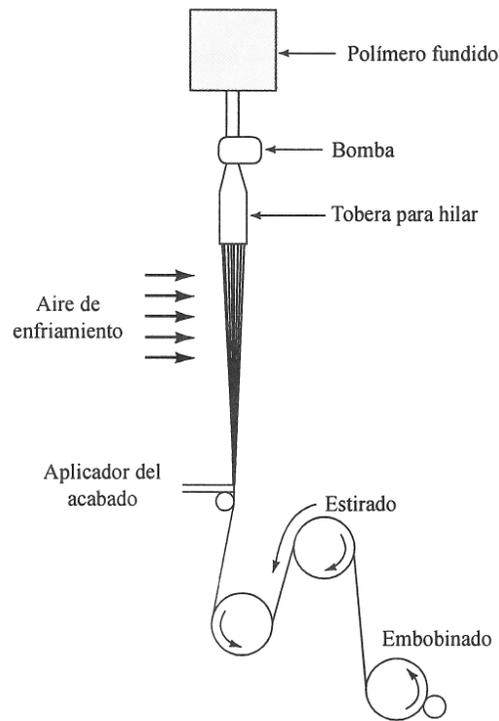


Figura 3.1 Aparato de hilado de fundido: se funde el polímero y se impulsa con presión a través de varios agujeros de la hilera. Al extruirlos, los filamentos se estiran y se enfrían con aire. Se aplica un acabado a la fibra y se juntan y devanan en un carrete o bobina.

3.1.2. HILADO EN SOLUCIÓN.

Algunos polímeros, como la celulosa y el poliacrilonitrilo no se pueden calentar para fundirlos, porque se descomponen antes de fundir. Estos polímeros se pueden hilar con técnicas en solución. En el hilado en seco, el polímero se disuelve en un solvente volátil adecuado y la solución, llamada dopa, es extruida pasando por los agujeros de la tobera de hilar y entra al aire. La evaporación de solvente facilita la precipitación del polímero en forma de fibra. El hilado en seco es distinto del hilado en húmedo, en el que la dopa se extruye en un líquido no solvente, donde se logra la precipitación por la difusión de ése líquido hacia adentro. Después de formar la fibra, las fibras hiladas en solución, al igual que las hiladas fundidas, se estiran para impartirles orientación molecular. En la figura 3.2 se señalan los aparatos normales para hilar en líquido y en seco.

Las variaciones de las técnicas de hilado en fundido y en solución se implementan según se requieran. Los materiales cristalinos líquidos, o los polímeros en forma de varilla que se caracterizan por orientación molecular en el fundido o en la solución, se procesan en una forma que conserva el alineamiento molecular y lo dirigen a lo largo del eje de la fibra. Las fibras producidas usando polímero líquido cristalino, como el Kevlar o el Vectran, tienen una resistencia y un módulo muy grandes. La fibra Spectra de polietileno se hila en seco a partir de un gel formado solo por unos cuantos puntos porcentuales de polímero de peso molecular ultraalto (millones de g/mol) en solvente. La orientación molecular extremadamente alta se logra aplastando el gel al eliminar el solvente y por repetidos pasos de tensión. Al igual que el Kevlar y el Vectran, el Spectra es kilo por kilo, más fuerte y más rígido que el acero.

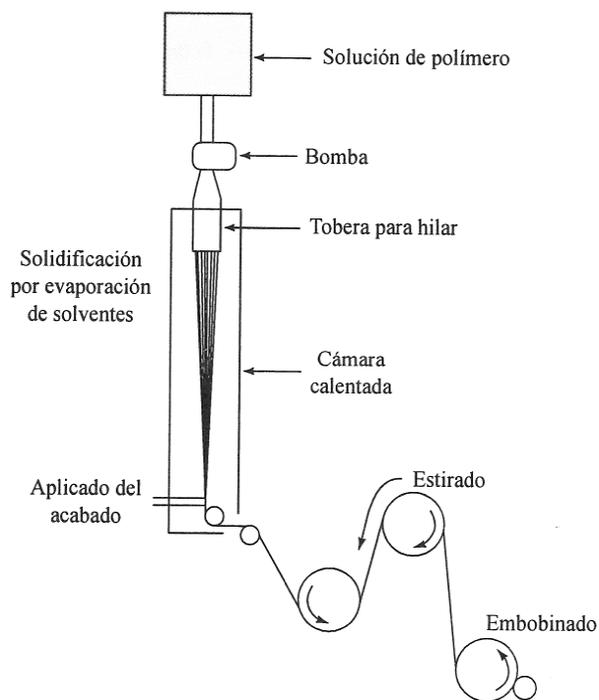


Figura 3.2 Aparato de hilado en seco. El polímero se disuelve en solvente en concentraciones relativamente altas (mayores del 10%) para formar un fluido viscoso (dopa). La dopa se impulsa a través de una tovera de hilar y entra a aire caliente (seco), o a un baño de coagulación (húmedo), donde la fibra se estira y el solvente se elimina de ella, causando la precipitación. Se aplica un acabado o lubricante al haz o hilo, y el producto se devana en una bobina o en un carrete.

3.1.3. PIRÓLISIS CONTROLADA.

La pirólisis de precursores orgánicos y organometálicos (materias primas) ha llegado a ser un proceso comercial importante para producir fibras cerámicas y de carbono. En esta técnica, se forma una fibra precursora de polímero que contenga los elementos de interés, mediante técnicas convencionales. A continuación la fibra se piroliza (se calienta hasta producir un cambio químico) sin fundirla.

Como ejemplo de fibras que se pueden fabricar con la pirólisis están las de carbono, hechas a partir de precursores acrílicos. En los pasos de pirólisis, todos los átomos de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se eliminan y al mismo tiempo la fibra retiene su integridad, dejando atrás solo el carbono. La figura 3.3 es un esquema de los diversos pasos requeridos para convertir una fibra acrílica en una de carbono de alta resistencia o de alto módulo de elasticidad.

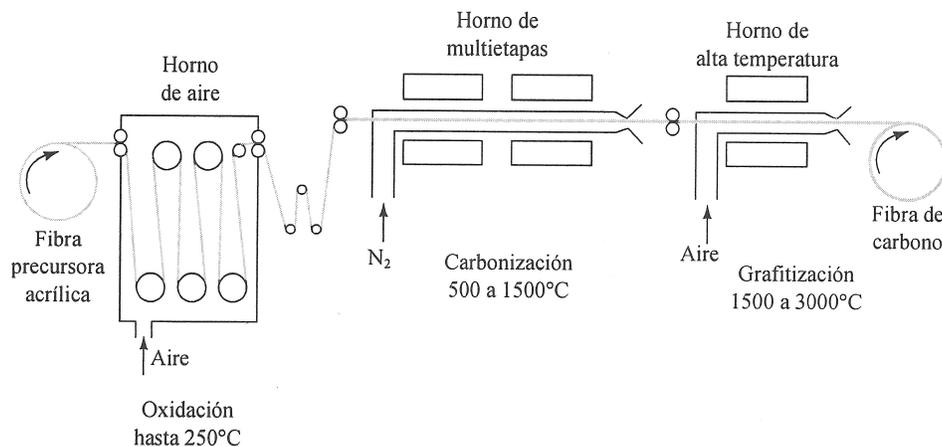


Figura 3.3 Proceso esquemático para convertir acrílico en fibra de carbono. Una hebra de acrílico, con contenido ácido, avanza bajo tensión en un horno de aire circulante a unos 250°C, donde la fibra se oxida sin fundirse. El material estabilizado negro se carboniza a unos 1500°C en una atmósfera inerte para eliminar todos los átomos, excepto los de carbono. Por último, la fibra se calienta a temperaturas de hasta de 3000°C para desarrollar un módulo de elasticidad alto.

Las fibras de carburo de silicio también se fabrican con este método. Se calienta una fibra de organosilano polimérico bajo condiciones controladas para eliminar todos los átomos excepto los de Si y los de C, como se indica en la figura 3.4. El carbono y las fibras de SiC se usan normalmente en materiales compuestos de alto rendimiento.

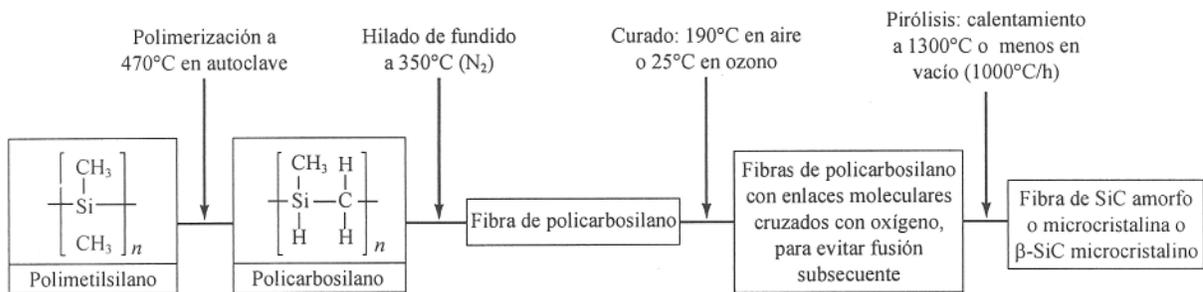
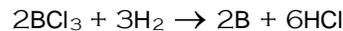


Figura 3.4 Formación de fibra de carburo de silicio por pirólisis del organosilano. El polímero polycarbosilano se hila fundido a unos 350°C en una atmósfera inerte, y sigue un curado u oxidación por aire en una atmósfera que contiene gran concentración de oxígeno reactivo. Las fibras con enlaces cruzados o estabilizadas se pirolizan a temperaturas hasta de 1300°C en el vacío para formar fibras de SiC amorfas o microcristalinas.

3.1.4. PROCESOS EN FASE VAPOR.

Sólo hay una cantidad pequeña de fibras que se fabrican con deposición química de vapor, debido al alto costo del proceso. Las fibras de boro son las que más se fabrican con este proceso. En él, se alimenta un alambre de tungsteno pequeño calentado por resistencia a una cámara que contiene BCl₃ y H₂ gaseosos. El BCl₃ gaseoso se descompone y forma boro elemental, que se deposita sobre el sustrato de tungsteno, y HCl, que se elimina de la cámara, según la reacción:



Las fibras grandes que resultan tienen alto módulo de elasticidad, resistencia regular, y baja densidad. También se han fabricado fibras de carburo de silicio con la deposición química de vapor.

Las fibras de sílice de calidad óptica se producen normalmente por hidrólisis a la llama. En esta técnica, se combina tetracloruro de silicio con oxígeno para formar SiO₂ y HCl. La sílice se deposita en una barra de grafito en forma de hollín, como se observa en la figura 3.5. Después de haber juntado cierta cantidad de hollín, se termina la hidrólisis, el hollín se aplasta con calor y se saca la varilla de grafito, y la forma se hila fundida en monofilamentos. Antes de permitir que los filamentos toquen cualquier cosa, se aplica una capa de polímero a su superficie. Esta técnica puede producir fibras de vidrio con bajo residuo de hidroxilo y, en consecuencia, con baja atenuación. Estando protegidas las superficies, las fibras se protegen contra la formación de grietas superficiales que dispersan la luz.

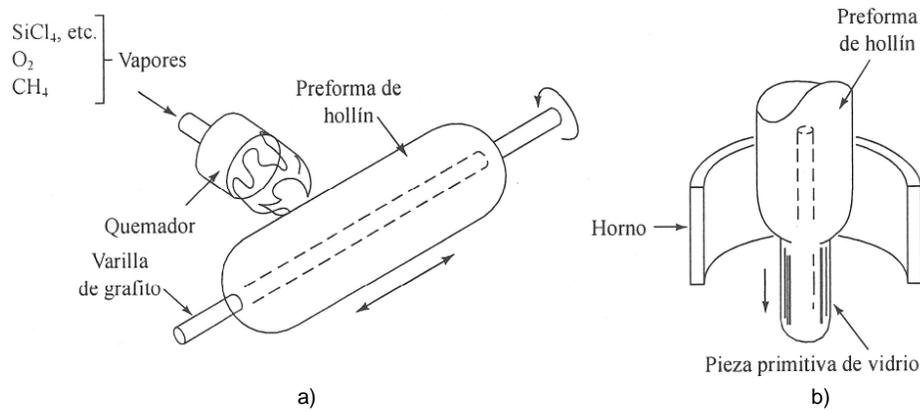


Figura 3.5 Formación de preformas de sílice para guías de onda óptica. Se combina tetracloruro de silicio con hidrógeno en una llama para producir sílice, que se deposita en una barra de grafito en forma de una preforma de hollín. La preforma de hollín se densifica en un segundo paso y finalmente se hila formando una fibra.

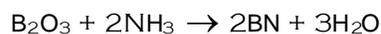
3.1.5. SINTERIZADO.

Es posible moler casi cualquier material cerámico o metálico para formar un polvo fino; a continuación el polvo se puede hilar en húmedo o en seco como un lodo en forma de fibras, que se puede secar y a continuación calentar para eliminar el aglomerante, y después sinterizar las partículas. Las fibras de alúmina (Al_2O_3) se han fabricado con esta técnica; sin embargo, esas fibras tienen una resistencia comparativamente baja por la estructura de grano un tanto gruesa que resulta y que contiene grandes defectos.

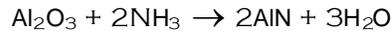
3.1.6. REACCIÓN QUÍMICA.

Se han desarrollado fibras cerámicas refractarias con una gran creatividad. La deposición química de vapor es costosa, parece que la pirólisis se limita a unas cuantas composiciones, y el sinterizado tiene problemas en cuanto a la buena resistencia. En este apartado describiremos tan sólo algunas de las numerosas técnicas que se han desarrollado para producir fibras cerámicas.

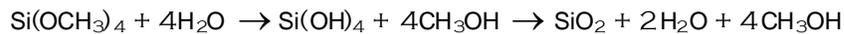
Las fibras de vidrio de Borato (B_2O_3) se pueden hilar y fundir con facilidad. Las fibras resultantes pueden hacerse reaccionar con amoníaco para convertirlas en nitruro de boro, que es un material refractario con propiedades mecánicas y térmicas excelentes:



También se pueden nitrurar las fibras de alúmina (Al_2O_3). El producto es nitruro de aluminio (AlN), que es un material con una combinación excelente de propiedades térmicas y dieléctricas:



También se pueden fabricar fibras usando la técnica sol-gel. Se mezclan los alcóxidos, que son líquidos simples y fácilmente asequibles, con agua en un cosolvente adecuado, que por lo general es alcohol. Bajo condiciones ácidas o básicas, la solución reacciona polimerizándose por condensación y produce óxidos que contienen algunos grupos orgánicos residuales. El material se puede hilar formando fibras cuando la mezcla de reacción llega a tener una viscosidad apropiada. El óxido puro se obtiene calentándola para eliminar las moléculas orgánicas restantes. Se han preparado sílices de alta pureza con ésta técnica:



En un proceso parecido, se puede desestabilizar un sol estable y hacerlo que se polimerice por condensación y forme una precerámica polimérica que contenga átomos de metal y no metal adecuados, como por ejemplo Al y O. El polímero de bajo peso molecular se puede hilar en seco y tratar térmicamente para formar un material inorgánico fibroso. Este proceso es un híbrido de las técnicas de pirólisis y de sol-gel. Las fibras hechas en esta forma tienen gran resistencia en comparación con las que se producen con la técnica de sinterizado.

3.1.7. ARREGLO DE LAS FIBRAS.

Los filamentos excepcionalmente finos se reúnen en forma de hebras, hilos o mechas. En los hilos se retuercen hasta 10000 filamentos para producir la fibra. Una mecha contiene desde unos cuantos cientos a más de cien mil filamentos sin retorcer. Las hebras son paquetes sin retorcer de filamentos, hilos o mechas.

Frecuentemente, las fibras se cortan en tramos de un centímetro o menos. Estas fibras, conocidas también como hilachos, son fáciles de incorporar en la matriz y son comunes en los materiales compuestos de moldeo de láminas (SMC) y de moldeo en volumen (BMC) para materiales compuestos de matriz polimérica. Muchas veces, las fibras están presentes dentro del material compuesto con una orientación al azar o aleatoria.

Para materiales compuestos de matriz polimérica, se pueden procesar fibras largas o continuas en forma de esteras o de telas. Las esteras contienen fibras sin tejer orientadas al azar y sujetas apenas por una resina polimérica. Las fibras también se pueden entramar, trenzar y tejer en tejidos bidimensionales o tridimensionales como se menciona en el capítulo anterior. Después se impregnan con una resina polimérica. En este punto del proceso, las resinas todavía no se han polimerizado completamente; estas esteras o telas se conocen como prepregs.

Cuando es necesario introducir fibras alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica, se pueden producir cintas. Las fibras individuales se pueden desenrollar desde carretes sobre un mandril, que determina el espaciamiento de las fibras individuales e impregnadas y preformadas mediante una resina polimérica. Estas cintas, con un espesor de sólo un diámetro de fibra, pueden tener un ancho de hasta 48 pulgadas. La figura 3.6 muestra que las cintas también se pueden fabricar cubriendo las fibras con capas superiores e inferiores de hoja metálica que después se juntan mediante unión por difusión.

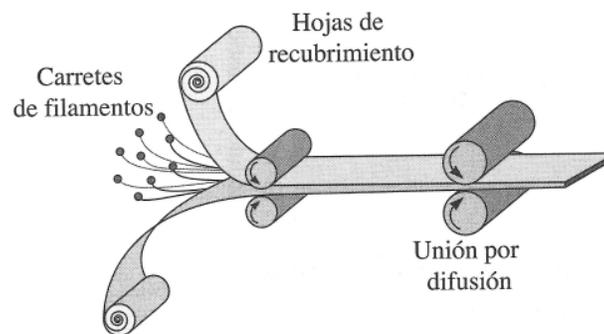


Figura 3.6 Producción de cintas de fibra con encapsulamiento de fibras entre láminas de metal mediante unión por difusión.

3.2. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

Existen varios procesos para la obtención de materiales compuestos de matriz polimérica sin embargo son tres los principales procesos:

Moldeo por Transferencia de Resina (**RTM**, Resin Transfer Molding).

Materiales Compuestos de Moldeo de Láminas (**SMC**, Sheet Molding Compound).

Materiales Compuestos de Moldeo en Volumen (**BMC**, Bulk Molding Compound).

3.2.1. MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM).

El **RTM** es un proceso a baja presión y molde cerrado que permite la fabricación de materiales compuestos, artículos de alta calidad y tamaños de pequeños a grandes. El proceso se diferencia de otros en que el refuerzo seco y la resina son combinados dentro del molde para conformar el material compuesto. La fibra de refuerzo, que puede ser preformada, se coloca dentro del molde de la herramienta y después se cierra. Un tubo conecta la cavidad cerrada con un abastecedor de resina líquida, después es bombeada o transferida dentro de la cavidad para impregnar el refuerzo. Finalmente se deja su tiempo adecuado para el curado. Este proceso se esquematiza en la figura 3.7.

Una variante de este método es la inyección de resina, asistido por vacío en la cual se construye un molde con materiales de bajo costo, como las resinas epoxi. El refuerzo se corta para llenar los requerimientos del patrón de geometría y es arreglado en el molde a mano. Las piezas de refuerzo deben colocarse en el molde a un tiempo o preensambladas y colocadas en el molde como una forma unitaria, después cuando el molde se cierra y se asegura con pernos o barras. Se puede aplicar un vacío para extraer el aire, pero la resina es inyectada a bajas presiones, casi siempre a presión atmosférica.

El mayor beneficio del proceso es la habilidad para fabricar largas y complejas estructuras con un máximo de partes integradas a bajo costo.

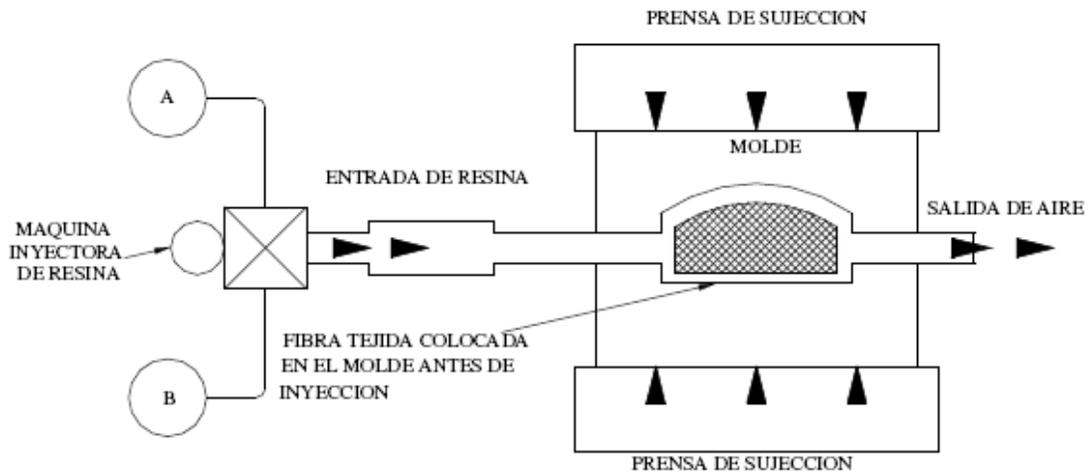


Figura 3.7 Proceso RTM.

3.2.2. MATERIALES COMPUESTOS DE MOLDEADO DE LÁMINAS (SMC).

El **SMC** es un material en lámina que es hecho por fibras de vidrio cortadas (o fibras continuas girando) dentro de una placa de película plástica (usualmente polietileno), en el cual una mezcla resina/iniciador/relleno se coloca como se muestra en la figura 3.8. Otra película, conteniendo la mezcla compuesta dentro de ella también, es colocada arriba, y después el sandwich de la resina mezclada y vidrio cortado se pasa entre rollos de compactación para mojar las fibras y mezclar a fondo los constituyentes. El material es ligeramente curado (también llamada etapa B, envejecimiento o madurado) y enrollado para envío.

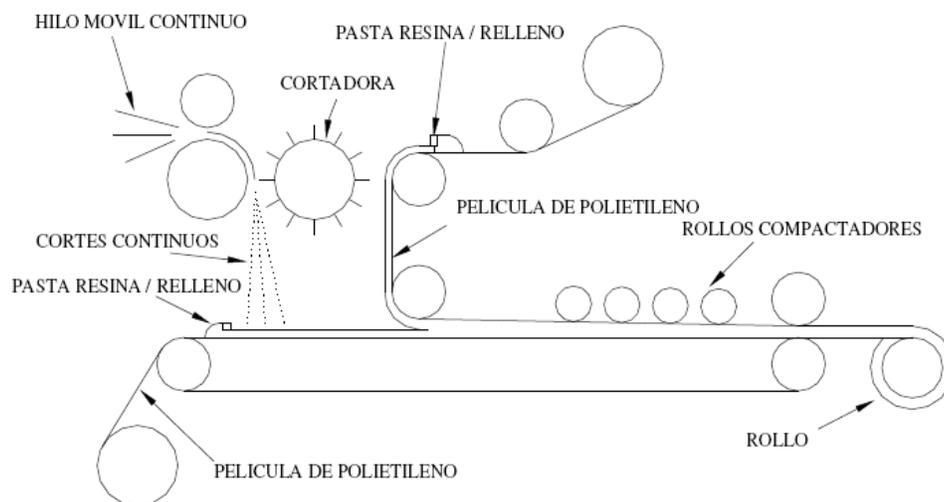


Figura 3.8 Proceso SMC.

Un proceso típico **SMC** incorpora del 30 al 50% de fibras (de 1 a 3 pulgadas de longitud), 25% de resina (usualmente polyester), y de un 25 a un 45% relleno (generalmente arcilla, alúmina o carbonato de calcio).

Después del envejecido, el material obtenido por **SMC** tiene una textura similar a la del cuero. Cuando éste está listo para el moldeo, puede ser cortado del rollo y la película plástica removida y cargada dentro de una prensa de compresión para moldeo. Por este proceso se pueden obtener piezas grandes como partes de automóviles.

3.2.3. MATERIALES COMPUESTOS DE MOLDEADO EN VOLUMEN (BMC).

En el proceso **BMC** de la combinación de fibra corta de vidrio, resina, iniciador, y relleno se obtiene una pasta con una composición similar a la del proceso **SMC**. Sin embargo, el proceso **BMC** es un mezclado por lotes de todos los componentes para obtener una masa moldeable y es vendido en forma de leño. El material resultante es llamado premezcla. La fibra de vidrio contenida en el **BMC** es generalmente de un 5 a un 10% menor que el **SMC** y las fibras son generalmente menores que una pulgada. Sin embargo, partes hechas por **BMC** no son tan fuertes como aquellas obtenidas por **SMC**. EL material **BMC** es usualmente mezclado en el sitio de moldeo pero puede también ser comprado de fabricantes comerciales, los cuales venden el material como preformas listas para usarse.

El proceso **BMC** está diseñado para colocar un peso sobre el material (la carga) dentro de la parte baja del molde. Los moldes son entonces cerrados con presiones, temperaturas y ciclos como los del proceso **SMC**. Algunas consideraciones especiales deben darse para la viscosidad del **BMC** con el propósito de asegurar que la mezcla sea homogénea. Si la viscosidad es demasiado baja, cuando el molde enfría la mezcla, la resma puede enfriarse fuera de las fibras resultando en áreas ricas en resina y dejando las fibras al descubierto. Por otro lado, si la viscosidad es demasiado alta, el flujo del material puede no ser suficiente para llenar el molde.

3.2.4. DEVANADO DE FILAMENTOS.

El enrollamiento continuo o filamentario, es un proceso de fabricación en el que refuerzos continuos en forma de rovings (los roving son ensamblados sin torsión de filamentos –roving directo– o hilos de vidrio -roving ensamblado– que han recibido un ensimaje plástico compatible con las resina), monofilamentos impregnados o bandas son enrollados a grandes velocidades y de forma precisa sobre un mandril que rota entorno a su eje de giro.

En la figura 3.9 se observa el proceso de enrollado de un depósito cilíndrico. Mientras el mandril, con la forma interior del depósito, gira, el sistema de alimentación de fibra impregnada en resina avanza longitudinalmente. Ambas velocidades están sincronizadas para controlar el ángulo de enrollado del refuerzo así como su correcto posicionamiento.

El ángulo de enrollado puede variar desde bajos ángulos “longitudinales” (0°) hasta altos ángulos “circunferenciales” (90°) con respecto al eje del mandril. Cualquier ángulo “helicoidal” puede ser enrollado.

El posicionamiento del refuerzo puede hacerse en bandas adyacentes hasta cubrir la superficie del mandril y el espesor de la pared o mediante modelos de enrollado repetidos que a través del apilamiento de varias capas consiguen cubrir la superficie del mandril y el espesor de la pared.

El proceso básico aquí descrito está sujeto a numerosas variaciones ofreciendo un amplio espectro de tipos de estructuras, diseños, combinaciones de materiales y equipos.

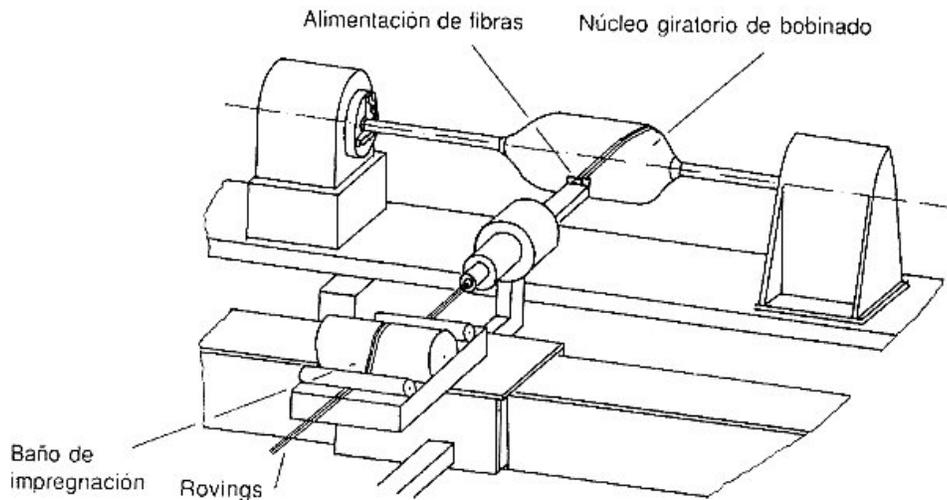


Figura 3.9 Proceso de enrollado de un depósito cilíndrico.

Las estructuras que pueden ser fabricadas mediante enrollamiento filamentario son necesariamente de revolución, con simetría cilíndricas, esférica, cónica o con formas geodésicas, aunque existen otras formas que pueden ser enrolladas siempre que no tengan zonas cóncavas con curvaturas entrantes en donde el refuerzo no podría ser posicionado mediante este proceso y sería necesario usar métodos alternativos para terminar estas zonas. El diámetro de estas estructuras, como longitud característica, puede variar de unos pocos milímetros hasta varios metros.

Estén dos procedimientos de moldeo mediante enrollamiento filamentario, denominados:

- o Procedimiento vía seca
- o Procedimiento vía húmeda

Estos dos procedimientos se diferencian esencialmente por el estado físico de las materias primas utilizadas, lo que conlleva inevitablemente diferencias desde el punto de vista operativo:

Procedimiento vía húmeda

En el procedimiento por vía húmeda, el bobinado se efectúa a partir de hilos o conjuntos de hilos en paralelo (rovings) con un número de hilos determinado y una resina líquida, usualmente termoestable, que contiene los diferentes elementos necesarios para su curado. Hilos o rovings son desenrollados, impregnados en resina líquida por paso a través de un recipiente de impregnación, sometidos a un escurrido que limita la cantidad de resina impregnada. Después de la impregnación y a través de una serie de órganos de guiado, los hilos son depositados sobre el mandril portador de la estructura bobinada. Una vez terminado el bobinado, la estructura fabricada se deja a temperatura ambiente o se lleva a la estufa para favorecer el proceso de curado de la matriz termoestable. Se aconseja que aquellas piezas de compromiso estructural sean postcuradas en horno.

Procedimiento vía seca

En este caso, el bobinado de las estructuras se realiza a partir de conjuntos, a menudo de poco número de hilos, preimpregnados, de resina de poliéster o epoxi; esta resina contiene todos los ingredientes necesarios para su endurecimiento. Durante la fabricación del preimpregnado, a fin de hacerlo fácilmente manipulable, la resina ha sido llevada a un estado de viscosidad elevada, sea por pre-congelación o sea por evaporación de un disolvente adicionado o preliminar.

De igual forma que en el procedimiento vía húmeda, las mechas son deslizadas por el exterior de las bobinas montadas sobre un tubo-soporte, solicitadas y guiadas hasta el dispositivo que asegura la aplicación de la banda sobre el mandril. Cuando el bobinado está terminado, la estructura es sometida a polimerización, como en el caso del moldeo por vía húmeda, bien sea por medio de vacío-horno o autoclave. El bobinado a partir de mechas preimpregnadas es más fácil que el bobinado por vía húmeda, por el hecho de la supresión del sistema de impregnación.

Existen dos tipos de rovings preimpregnados. Los primeros están realizados directamente a partir de hilos base, impregnados de resina, juntados, tratados térmicamente y bobinados. Los segundos son obtenidos por impregnación en condiciones particulares del ovillo de roving entero. En general, la relación fibra/resina se sitúa alrededor de 80/20.

El moldeo a partir de preimpregnado ha sido utilizado sobre todo para las aplicaciones con muy altas solicitaciones para las que el precio suele tener una importancia secundaria. Al contrario, para aplicaciones en las que el precio es el factor principal, se tiene el recurso del moldeo en fase húmeda.

Los mandriles de bobinado deben responder a las siguientes exigencias:

- Deben ser idénticos al perfil y a las dimensiones de las piezas a moldear. Además deben ser dimensionalmente estables y deben tener un coeficiente de expansión apropiado para el refuerzo usado.
- Deben ser suficientemente resistentes para soportar su propio peso y para soportar los esfuerzos ejercidos por el bobinado bajo tensión y las concentraciones de polimerización sin deformarse.
- No deben ser demasiado pesados, lo que ocasionaría problemas de rendimiento de máquinas y manipulación.
- Deben ser capaces de soportar las condiciones de polimerización de las resinas, tanto desde el punto de vista químico como desde el punto de vista térmico.
- Deben estar diseñados para facilitar el desmoldeo sin perjudicar las piezas.
- El coste debe ser apropiado al valor del componente fabricado, y al número de piezas que se van a fabricar con este útil.

Tipos de Mandriles

Mandriles desmontables en aleación ligera: Su realización es muy delicada y su precio elevado. Sus desmontajes y montajes necesitan un cierto tiempo, en cambio son precisos, resistentes y ligeros. Se utilizan perfectamente para las fabricaciones de series importantes.

Mandriles destructibles en yeso: Son moldeados, fabricados y tratados en superficie. Se usan para aplicaciones de gran diámetro. Se necesitan refuerzos interiores para que soporten la presión del bobinado. Se les extrae rompiéndolos por el interior, aunque algunas veces la rotura puede ser complicada y puede causar daño a la pieza. Se suelen incluir cadenas embebidas en el mandril para facilitar la rotura del mismo. Son utilizados para piezas complejas y siempre en series limitadas.

Mandriles fundible en aleaciones metálicas: Estos mandriles son muy pesados por la alta densidad de los materiales y suelen deformarse ante moderadas tensiones de enrollado. Están limitados para depósitos pequeños del orden de 0.3m de diámetro por 0.3m de longitud.

Mandriles de arena soluble en agua: Se usan para piezas de diámetro superior a 1.5m y para series limitadas. Se disuelven rápidamente en agua caliente. La más importante limitación es su baja resistencia a compresión.

Mandriles de sal fundible: Para diámetros de piezas superiores a 0.6m son más adecuados que los mandriles de aleaciones de bajo punto de fusión, y además son fácilmente extraíbles.

Mandriles inflables: Estos moldes no son adecuados cuando sea necesario resistir cargas de torsión. Una técnica para mejorar la resistencia a torsión es rellenar el mandril con arena o aplicar vacío. Existen piezas con formas cóncavas con curvatura entrante que no pueden ser obtenidas mediante enrollamiento continuo. Un posible método para obtener estas formas es la transferencia de la pieza todavía sin curar a un molde cerrado y hacerla polimerizar con la forma cóncava gracias al conformado mediante molde inflable.

El escoger una u otra de estas soluciones es, ante todo, función del tipo de pieza a realizar, de la cantidad y del coste.

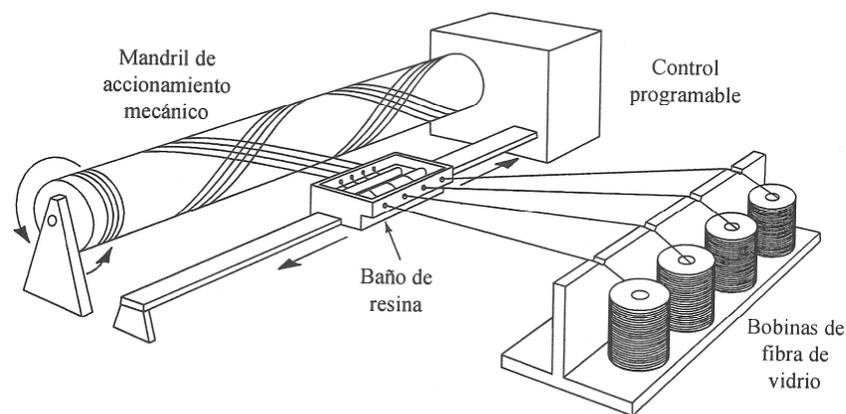


Figura 3.10 Esquema del método de devanado de filamento para fabricar partes cilíndricas con matriz polimérica.

3.2.5. OTROS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

La colocación a mano es la técnica más sencilla para fabricar materiales de matriz polimérica. En las técnicas de elaboración manual, las cintas, esteras o tejidos se extienden sobre una forma, saturada con resina polimérica (la resina se puede aplicar con una brocha o se rocía en las fibras) y se presionan para asegurar un buen contacto y una completa eliminación de la porosidad; finalmente se curan o fraguan. De esta manera, se pueden fabricar carrocerías de automóviles y de camiones de fibras de vidrio, lo cual, por lo común, es una operación lenta y que requiere mucha mano de obra.

Si se usan fibras cortas, estas se rocían junto con una resina sobre un molde. A continuación el material compuesto se cura o se dejan desarrollar los enlaces cruzados a la temperatura adecuada. Esta técnica se usa con más frecuencia para materiales compuestos que usan fibras de vidrio en resinas termoestables, como por ejemplo las láminas de compartimento de baños.

También se usa la colocación a mano para fabricar componentes laminados de materiales compuestos. En esta técnica, las hojas impregnadas de resinas parcialmente curadas con fibras orientadas en una sola dirección se apilan una sobre otra en un molde con las orientaciones deseadas de fibra, y a continuación se presanan entre sí en una autoclave para formar la parte compuesta. La figura 3.12 muestra el proceso de apilamiento de los preimpregnados para formar un laminado. Aunque es de trabajo intensivo, esta técnica es versátil y se puede usar para fabricar materiales compuestos híbridos que contengan más de un tipo de fibras.

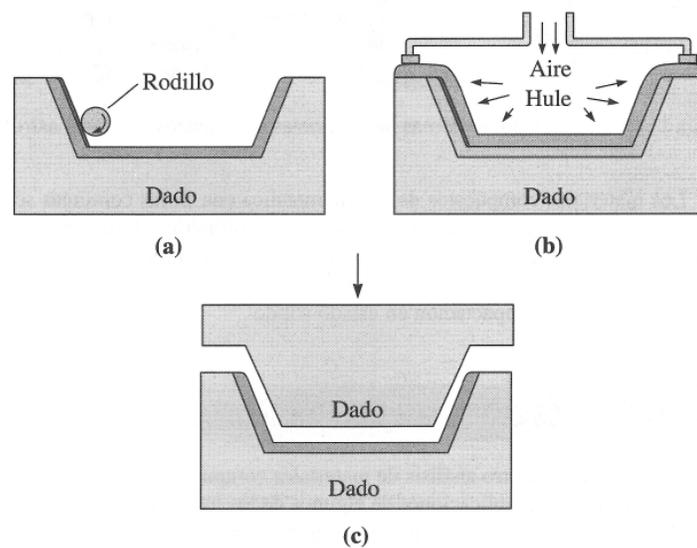


Figura 3.11 Producción de formas de materiales compuestos en dados (a) a mano, (b) mediante moldeo a presión y (c) mediante moldeo con dados macho y hembra.

Las cintas y las telas también se pueden colocar en un dado y pueden formarse mediante el moldeo por bolsa. Se introducen gases a alta presión o se provoca un vacío, para obligar a que las capas individuales se junten de tal manera que durante el curado se obtenga una buena unión. Utilizando estas técnicas, se han fabricado grandes componentes de matriz polimérica para los fuselajes de aviones militares. En el moldeo con dados macho y hembra, se colocan fibras cortas o esteras en un dado hecho en dos piezas; al cerrarse éste, se obtiene la forma deseada.

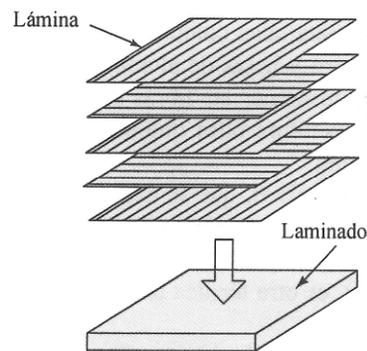


Figura 3.12 Esquema del proceso de tendido a mano para producir laminados con matriz polimérica.

La pultrusión o extrusión estirada es una forma eficaz de fabricar un producto de forma simple con sección transversal uniforme de fibras continuas, como por ejemplo vigas I (véase Fig. 3.13), formas redondas, rectangulares, tuberías, placas o láminas. En esta técnica, las fibras o las esteras son tiradas por carretes, pasadas a través de un baño de resina polimérica para su impregnación. Las fibras preimpregnadas que pueden ser de vidrio, Kevlar, o carbono, son unidas para producir una forma específica antes de entrar en un dado caliente para su curado. El curado o fraguado de la resina se efectúa casi de inmediato, por lo que se fabrica un producto en forma continua. Las resinas que se usan son poliésteres y algunos epóxicos. Esta técnica se parece al proceso de extrusión. La extrusión y el devanado de filamento son ejemplos de procesos automatizados capaces de entregar productos de alta calidad. El material extruido puede conformarse subsecuentemente en formas un tanto más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquíes.

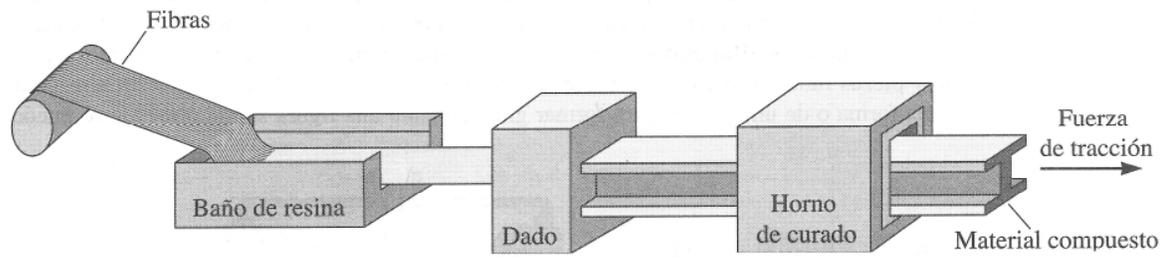


Figura 3.13 Proceso de pultrusión para fabricar perfiles de sección constante con materiales reforzados con fibras.

Con frecuencia, a las fibras se les da un tratamiento superficial antes de incorporarlas a la matriz. Por ejemplo, se han desarrollado agentes de acoplamiento de silano para asegurar un buen humectamiento entre el vidrio y la resma y para contribuir a formar enlaces químicos entre la fibra y la matriz.

3.3. APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA.

Los materiales compuestos de matriz polimérica pueden ser aplicados en un buen número de campos tecnológicos y del desarrollo industrial. Estos materiales aportan una alternativa de solución a varias de las necesidades existentes en diversas áreas tecnológicas.

En la aeronáutica se encuentra que un amplio conjunto de elementos de los aviones están fabricados con materiales compuestos, los más utilizados son los de matriz epoxica y refuerzo de carbono. La utilización de materiales compuestos en aeronáutica se justifica por la necesidad del ahorro de peso.

La industria militar también ha hecho uso de los materiales compuestos, como en la fabricación de blindaje a base de fibra de vidrio-epoxi preimpregnado, posee unas optimas prestaciones en cuanto a absorción de impactos de alta energía y peso se refiere. También en la fabricación de cascos en aramida-epoxi preimpregnado resistente a impactos de baja energía, o en la fabricación de tubos lanza-misiles, los cuales se fabrican mediante el proceso de enrollamiento continuo con fibra de vidrio-epoxi.

En telecomunicaciones la fabricación de soportes de radar de fibra de vidrio con resina de epoxi es una aplicación adecuada para materiales compuestos debido a las elevadas dimensiones y a la fácil moldeabilidad de las partes curvas. La estructura secundaria de los satélites de comunicaciones está

realizada en fibra de carbono-epoxi debido a los requerimientos de permeabilidad a las ondas electromagnéticas y reducción de peso.

En el ámbito de los deportes y el esparcimiento, la utilización de materiales compuestos incluye la fabricación de bicicletas, esquís, raquetas de tennis, y hasta piscinas realizadas en fibra de vidrio y resina de poliéster.

También en medicina se han fabricado equipos de rayos X realizado en fibra de carbono con resina de epoxi fabricados por RTM. La característica fundamental del material para este tipo de aplicaciones es su transparencia a los rayos X.

En la industria química la utilización de los materiales compuestos se limitaba solamente a silos de almacenamiento, pero la necesidad de contar con un material resistente al ataque químico, a la corrosión, flexible, con gran resistencia mecánica y ligereza, a obligado que los materiales compuestos de matriz polimérica se utilicen en diversas aplicaciones. Los usos más comunes son en la fabricación de tuberías elaboradas mediante enrollamiento continuo, utilizando como fase de refuerzo fibra de vidrio y como matriz resinas epoxi viniléster o poliéster en su mayoría. También se utilizan como encamizados en reactores, torres de destilación, y hasta como cubiertas en torres de refrigeración metalotextil. El uso de materiales compuestos en plataformas petrolíferas se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a la posibilidad de reducir el peso, lo que disminuye las dimensiones de los cilindros de flotación, y a la elevada resistencia a la corrosión.

Como se puede observar son muchas las ventajas y las aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica. En el siguiente capítulo y como objetivo principal de esta tesis, se propondrá una aplicación más de este tipo de materiales. Se propondrá la utilización de un material compuesto de matriz polimérica, como el material a utilizar para la fabricación de un digester anaerobio, debido a su gran resistencia a la corrosión.

CAPÍTULO IV

PROBLEMA DE CORROSIÓN EN UN DIGESTOR ANAEROBIO.

En los capítulos anteriores hemos hablado de la definición y clasificación de los materiales compuestos, los diferentes sistemas de materiales compuestos que existen. También, las materias primas y los diferentes procesos utilizados para su fabricación de los materiales compuestos de matriz polimérica, y diversos ejemplos de sus aplicaciones. Todo esto con la finalidad de que el lector, tenga un panorama más amplio de lo que son los materiales compuestos, de las ventajas y beneficios que pueden otorgarnos.

En el presente capítulo se discutirá la alternativa de utilizar un material compuesto de matriz polimérica, para la fabricación de un digestor anaerobio perteneciente a una planta de tratamiento de aguas residuales. Esto con la finalidad de solucionar el problema de corrosión que se presenta en el reactor anaerobio, el cual es originalmente fabricado de acero inoxidable AISI 430.

Comenzaremos el capítulo con una breve explicación del proceso de digestión anaerobia al que pertenece el digestor. Continuaremos con las etapas de la digestión anaerobia y el tipo de corrosión que se presentó en el digestor (biocorrosión); ya que, como se concluirá al finalizar estas secciones, es el mismo proceso de digestión anaerobia una de las causas de que se presente la corrosión. Finalmente, se propondrá un material compuesto de matriz polimérica, capaz de resistir las condiciones del proceso.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ANAEROBIO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Las aguas residuales de las industrias alimenticias se caracterizan por su alto contenido en DQO (es una medida cuantitativa de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación química del material orgánico presente en las aguas residuales), nitrógeno y fósforo por lo que han de tratarse convenientemente antes de proceder a su vertido. En las últimas décadas los sistemas de tratamiento anaerobio han demostrado ser muy adecuados para tratar este tipo de efluentes.

La tecnología anaerobia permite el tratamiento de las aguas residuales mediante la transformación de la materia orgánica en un biogás con un alto contenido en metano, que puede ser aprovechado energéticamente, generando asimismo una cantidad mucho menor de lodo de la producida

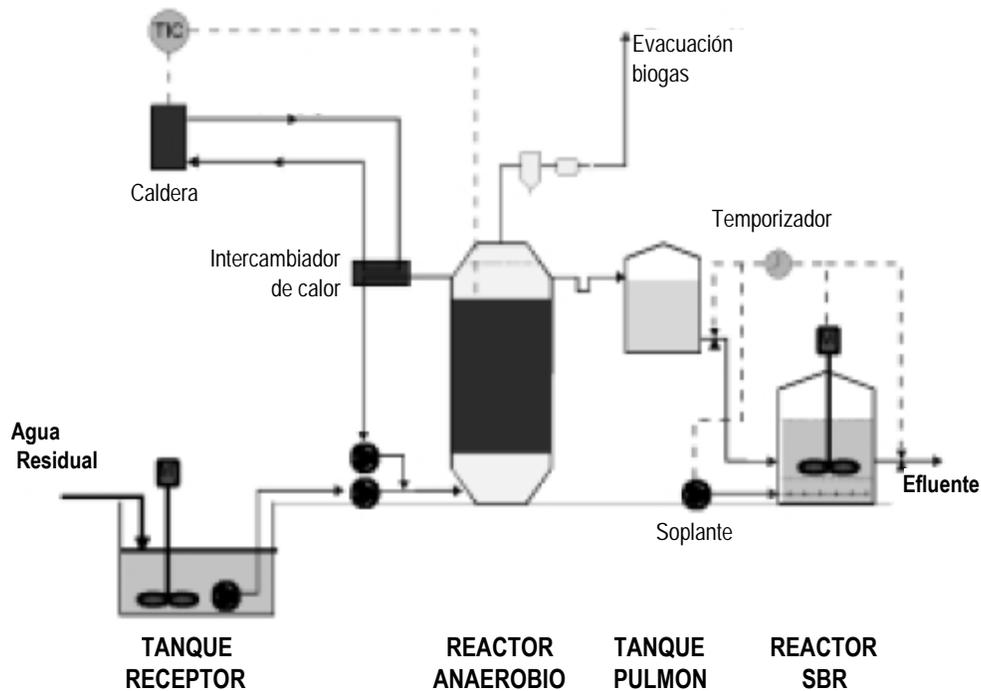


Figura 4.2. Diagrama esquemático de la planta piloto industrial utilizada.

Tanque de homogeneización: Las aguas residuales generadas en los distintos puntos y corrientes del laboratorio (aguas fecales, descarga de muestras de leche y otras aguas propias del laboratorio) llegan por gravedad hasta un tanque de recepción que tiene un volumen de 14 m³. Este tanque cumple una doble misión, por una parte permite la homogeneización de las distintas corrientes y, por otra, asegura una operación en continuo de la planta depuradora (24 h/día y 7 días/semana), independientemente de los períodos de trabajo del propio centro.

Reactor Anaerobio: El sistema anaerobio es un reactor de 12,6 m³ de volumen, construido en chapa de acero inoxidable AISI 304 y acabado exterior mediante chapa envolvente de acero inoxidable de 0.5 mm. Este reactor dispone de un sistema de recirculación mediante dos bombas helicoidales (una de reserva). Un intercambiador de calor de doble tubo actúa sobre la línea de recirculación para mantener la temperatura adecuada (37 °C), usándose agua caliente como elemento de calefacción, para lo cual se instaló una caldera de gas, depósito de almacenamiento de propano y chimenea de 3 metros de altura para la evacuación de los gases de combustión. El reactor anaerobio opera a un pH de 7, ya que a un pH diferente a este las bacterias formadoras del grano morirían. La alimentación se realiza por la parte

inferior a través de un anillo de distribución con cuatro entradas. Este reactor tiene instalados equipos de medida de temperatura, caudales de entrada y recirculación y caudal de biogás.

Tanque pulmón: Entre el filtro anaerobio y el reactor secuencial (SBR) se localiza un tanque pulmón de 4,4 m³, este tanque permite sincronizar la operación de los dos reactores ya que el primero opera en continuo y el segundo en discontinuo, por lo que el tanque recibe continuamente el efluente del reactor anaerobio, que se va acumulando en el mismo hasta que se abre la válvula de salida, momento en el cual todo su contenido pasa a la unidad SBR.

Reactor SBR: Esta unidad está construida en acero inoxidable y tiene un volumen máximo de 28 m³, dispone de soplantes para proceder a la aireación (1 y 1 de reserva) así como de agitadores mecánicos (1 y 1 de reserva), y tiene instalados un medidor de oxígeno disuelto y otro de potencial redox. La operación normal se lleva a cabo en un ciclo total de 24 horas que consta de 7 etapas (figura 4.3): dos etapas anóxicas durante las que se alimenta el sistema, dos etapas aerobias, una etapa de sedimentación, una etapa de vaciado del agua tratada y una última etapa de tiempo muerto. La alimentación al SBR se realiza dos veces por ciclo durante los primeros 15-30 minutos de cada etapa anóxica. Durante la fase de aireación en el SBR, el aire se introduce a través de una serie de difusores que están instalados en la parte inferior del reactor.

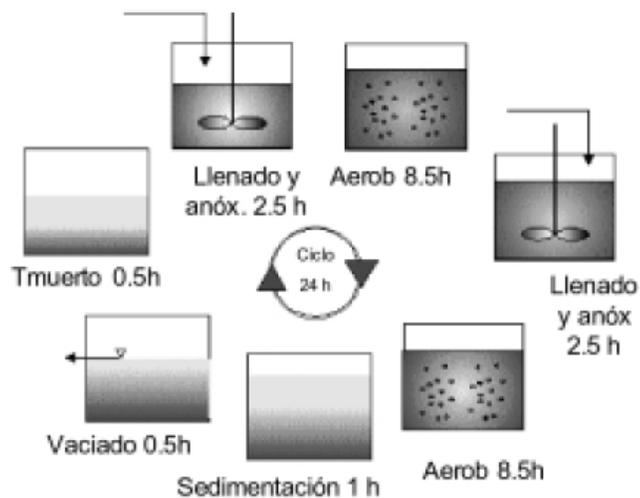


Figura 4.3. Estrategia de operación del SBR durante un ciclo de operación.

4.2. ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La mineralización de la materia orgánica por un sistema microbiológico mixto en condiciones de ausencia de oxígeno (o fuertemente reductores), se denomina digestión anaerobia.

El esquema más ampliamente aceptado de la digestión anaerobia de un sustrato con materia orgánica en suspensión, es el que involucra tres etapas: hidrólisis y fermentación, acetogénesis y metanogénesis.

El conocimiento actual de la microbiología de estos ecosistemas, ha demostrado que la degradación anaerobia involucra básicamente los siguientes grupos de bacterias:

Hidrolíticas y fermentativas

Acetógenas (OHPA)

Metanógenas acetoclásticas (MA)

Metanógenas hidrogenófilas (MH)

Posteriormente se propuso que el flujo de sustratos pasa por seis distintos procesos de conversión, incluidos en las tres etapas.

1. Hidrólisis (ruptura) y fermentación.
 - a) Hidrólisis de polímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos).
 - b) Fermentación de aminoácidos y azúcares.

2. Acetogénesis (producción de ácido acético)
 - a) Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes (β – oxidación)
 - b) Oxidación anaerobia de productos intermedios como ácidos grasos volátiles (AGV's) excepto el acetato.

3. Metanogénesis (generación de metano)
 - a) Conversión de acetato a metano.
 - b) Formación de metano a partir de CO_2 y H_2 .

El desarrollo de la digestión anaerobia, se establece cuando las bacterias son incapaces de alimentarse de material orgánico particulado, por lo que se deben hidrolizar (romper) inicialmente los

polímeros (carbohidratos, proteínas y lípidos) por medio de enzimas extracelulares a polímeros solubles o monómeros como azúcares, aminoácidos y grasas superiores.

Posteriormente los azúcares y aminoácidos son utilizados por los organismos fermentadores para producir acetato, CO₂, hidrógeno y biomasa, mientras que los ácidos grasos superiores son convertidos en ácidos grasos volátiles e hidrógeno, por los oxidantes anaerobios, mediante una reacción de β - oxidación.

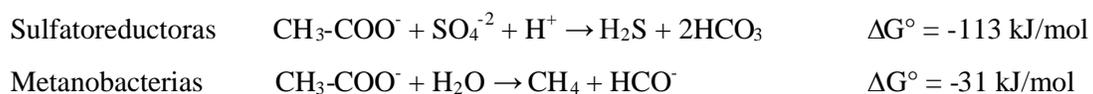
En la primera etapa los ácidos grasos volátiles (AGV's): acético, propiónico, butírico, isobutírico e isovalérico, representan los principales intermediarios de la digestión anaerobia.

El propianato y el butirato son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocido como OHPA (bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno), las cuales deben de existir en relación sintrónica con las metanógenas que utilizan hidrógeno. El acetato y el H₂ son los principales sustratos de las bacterias metanógenas.

Otras bacterias presentes en los digestores anaerobios, especialmente cuando hay presencia de sulfatos, son las llamadas sulfatoreductoras, que son organismos capaces de reducir los sulfatos a sulfuros de acuerdo a la reacción:



Estas bacterias utilizan, en medio anaerobio, el sulfato como aceptor final de electrones y al material orgánico como donador. Los géneros más comunes son la *Desulfovibrio* y algunas fermentativas, que utilizan el azufre de los aminoácidos (metionina y cisteína). Su importancia es grande ya que puede competir con las metanobacterias impidiendo la formación de metano. Aunque en general, las sulfatoreductoras utilizan ácido pirúvico y láctico, algunas pueden utilizar también acético en competencia con las metanobacterias.



De estas dos reacciones, la más favorecida termodinámicamente es la sulfatoreductora. Sin embargo en un digestor anaerobio esta reacción no se lleva a cabo en forma significativa a menos que

los sulfatos se encuentren en concentraciones elevadas; en este caso la producción de H_2S puede provocar problemas de corrosión en los reactores anaerobios.

La concentración de ácido sulfhídrico (H_2S) en solución acuosa juega un doble papel, a bajas concentraciones fomenta la actividad metanógena y a elevadas concentraciones (150 mg/l) la inhibe. Por lo anterior, se debe mencionar que el azufre sólo actúa como nutriente hasta una determinada concentración, 25mg/l.

La cantidad de sulfatos presentes en el agua residual es de suma importancia en la elección del tratamiento anaerobio; éste se propone para residuos industriales con alto contenido de sulfatos.

Una concentración de 250 mg H_2S /l, en un intervalo de pH entre 6.4 y 7.2, inhibe en un 50% la actividad metanógena de lodo granular disminuyendo la formación de gas, por tanto la pérdida de la producción de gas es lineal a la concentración de sulfuros.

Se ha observado que a pH de 7.0, la fracción no ionizada es muy grande, por lo tanto cuando hay una buena producción de biogás, el H_2S puede escapar de la solución.

Para la digestión anaerobia se han reportado como concentraciones límites de sulfuro disuelto en el influente 200-300 mg H_2S /l, mientras que la concentración de H_2S en el gas de salida no debe sobrepasar el 6%.

De todo lo anterior se puede deducir que es inevitable la formación de H_2S en el reactor anaerobio, ya que el azufre es un nutriente indispensable para las bacterias digestoras, de las cuales forman parte las bacterias sulfatoreductoras; y aun cuando se suministre solamente el azufre necesario como nutriente (25 mg/l), las bacterias reducirán el azufre de los aminoácidos presentes en el agua residual.

4.3. EL FENÓMENO DE LA BIOCORROSIÓN.

La resistencia a la corrosión del acero inoxidable se debe a una película «pasiva» de un óxido complejo rico en cromo, que se forma espontáneamente en la superficie del acero. Éste es el estado normal de las superficies de acero inoxidable y se conoce como «estado pasivo» o «condición pasiva». Los aceros inoxidables se autopasivarán espontáneamente cuando una superficie limpia se exponga a

un entorno que pueda proveer de suficiente oxígeno para formar la capa superficial de óxido rico en cromo.

Esto ocurre automática e instantáneamente, siempre que haya suficiente oxígeno disponible en la superficie del acero. No obstante la capa pasiva aumenta de grosor durante algún tiempo después de su formación inicial. Ciertas condiciones naturales, como el contacto con el aire o con agua aireada, crearán y mantendrán la condición pasiva de la superficie frente a la corrosión. De este modo los aceros inoxidable pueden mantener su resistencia a la corrosión, incluso si se hubiesen producido daños mecánicos (p.ej., rasguños o mecanización), y contar así con un sistema propio autorreparador de protección a la corrosión.

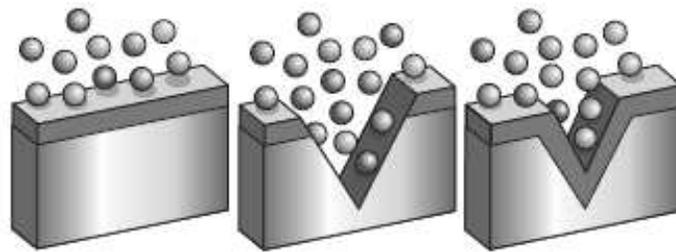


Figura 4.4. El acero inoxidable tiene una propiedad única: se autorrepara. Debido a los elementos de aleación del acero inoxidable, se forma una fina «capa pasiva» transparente sobre la superficie. Incluso si la superficie de acero inoxidable fuese rayada o dañada de algún otro modo, esta capa pasiva, de sólo unos átomos de espesor, se recompone instantáneamente por acción del oxígeno del aire o del agua. Esto explica por qué el acero inoxidable no requiere ningún recubrimiento u otra protección a la corrosión para mantenerse limpio y brillante incluso tras decenios de uso.

El cromo de los aceros inoxidables es el principal responsable de los mecanismos de autopasivación. A diferencia de los aceros al carbono o estructurales, los aceros inoxidables deben tener un contenido mínimo de cromo del 12% en peso. La resistencia a la corrosión de estos aceros al cromo puede mejorarse con la adición de otros elementos de aleación como níquel, molibdeno, nitrógeno y titanio (o niobio). Esto proporciona una gama de aceros resistentes a la corrosión para un amplio espectro de condiciones de trabajo, y además, potencia otras propiedades útiles como son la conformabilidad, la fuerza y la resistencia térmica (al fuego).

Los aceros inoxidables no pueden ser considerados como resistentes a la corrosión en todas las condiciones de trabajo. Dependiendo del tipo (composición) de acero, habrá ciertas condiciones en las que se pierda el «estado pasivo» y no pueda recomponerse. En ese caso la superficie se convierte en

«activa», y se produce la corrosión. Pueden darse condiciones activas en zonas pequeñas privadas de oxígeno de los aceros inoxidable, tal como en uniones mecánicas, esquinas compactas o en soldaduras incompletas o mal acabadas. El resultado puede ser formas «localizadas» de grietas o picaduras.

En el caso específico del proceso anaerobio de tratamiento de aguas, el cual utiliza microorganismos para la digestión del agua residual; la combinación de estos microorganismos con la suciedad, polvo, glóbulos grasos, ocasiona la formación de una película biológica (biofilm), la cual se endurece por efecto de las excreciones celulares (En cualquier otro equipo de algún otro proceso, también se pueden introducir células bacterianas o esporas de hongos por medio del agua de proceso). La formación de esta película biológica puede dar lugar a la biocorrosión de las superficies sobre las que se han depositado.

Se define biofilm como una población de microorganismos incluidos en una matriz orgánica polimérica adherida a una superficie. La matriz polimérica es conocida como EPS (Extracellular Polymeric Substances) y está constituida básicamente por polisacáridos y glucoproteínas que las bacterias desarrollan para su adhesión. Además de los EPS como mecanismos de unión, la acumulación de cargas electrostáticas así como las características de la superficie también influyen en la formación de los biofilms, siendo ésta más probable cuando la superficie presenta rugosidades. En caso contrario, cuando las superficies son pulidas y exentas de poros, disminuye el potencial de crecimiento bacteriano. La presencia de productos metabólicos como, polisacáridos, proteínas y lípidos actúan como agentes de unión, estimulando la formación de colonias microbianas.

Los efectos de la biocorrosión son similares a los producidos por la corrosión intergranular o la corrosión por picaduras. Los microorganismos aerobios o anaerobios que la producen desarrollan un proceso de despasivación enzimática sobre la superficie del acero inoxidable. El daño se debe a la presencia de productos de la descomposición celular que atacan directamente la superficie del metal, consumiendo iones en el proceso, y provocando de esta manera la corrosión.

Un ejemplo de ello lo constituyen las bacterias sulfato reductoras, causantes de la corrosión del acero inoxidable que, por un lado, forman sobre el metal precipitados que, al quedar adheridos en forma aislada, produciendo la destrucción de la película pasiva del acero y, por otro, ocasionan la formación del ácido sulfhídrico, mismo que ataca las zonas despasivadas ocasionando la formación de picaduras.

4.4. PROPUESTA DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA PARA LA FABRICACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO.

Como se pudo observar en el apartado anterior, son las bacterias sulfatoreductoras las responsables de que ocurra la corrosión en el digestor anaerobio. Desafortunadamente la mayoría de las soluciones recomendadas para combatir la biocorrosión, no son viables para el proceso de digestión anaerobia.

Se recomienda la esterilización mediante sistemas de lavado con agentes alcalinos y ácidos, y otros agentes antimicrobiológicos, pero esto ocasionaría la destrucción del sistema microbiológico responsable de la digestión anaerobia.

También recomiendan el uso del acero inoxidable AISI 316, el cual tiene la misma composición que el AISI 304 (0.05% C, 18% Cr, 8% Ni), Con la diferencia que contiene de 2 a 3% de molibdeno. Pero este acero tiene un costo mucho más elevado, y solamente disminuye los factores que generan la biocorrosión, pero no la evita.

Otra solución es la aplicación de un recubrimiento de resina protectora, ya que, la durabilidad de los materiales depende principalmente de la calidad de su superficie en exposición. Este recubrimiento es la parte que proporcionaría resistencia química al reactor y por tanto se debe tener gran cuidado durante su aplicación al acero por medio de brocha o con pistola de proyección hasta conseguir un espesor uniforme de 0.4 – 0.5 mm. Pero si la capa de recubrimiento es demasiado fina puede no curarse totalmente, y el acero podría quedar al descubierto, y por el contrario, si es demasiado gruesa, puede agrietarse o romperse, con la consecuente reducción de la resistencia. El resultado de una mala aplicación del recubrimiento, pueden ser formas localizadas de grietas o picaduras, que al tener el contacto con el ácido sulfhídrico la corrosión se hace extensiva.

Debido a todo lo anterior, es objetivo de este trabajo el proponer un material compuesto de matriz polimérica, como sustituto del acero para la fabricación de un reactor anaerobio. Las matrices con mejores propiedades químicas son la resina de epoxi y la resina viniléster.

Generalmente, bajo condiciones ambientales normales, el ataque ácido y alcalino sobre el material compuesto no es preocupante. El requisito principal es que las resinas deben ser curadas de manera apropiada.

La selección del material compuesto para aplicaciones químicas se ha apoyado tradicionalmente en los resultados de exponer laminados no sometidos a tensión a condiciones ambientales por períodos superiores a un año. En el caso de condiciones ambientales severas como ácido sulfúrico y clorhídrico, han sido objeto de análisis detallados para determinar los efectos de la temperatura, la concentración y la permeabilidad. La conveniencia del material viene dada por sus propiedades mecánicas residuales (dureza, resistencia a la flexión y rigidez) y por la observación visual de cualquier ampolla o delaminación.

Las variables a tener en cuenta en la selección de materiales compuestos bajo condiciones ambientales son:

Tipo de resina.

Tipo de fibra.

Tipos de exposición.

Siempre que sea posible hay que probar una muestra del laminado bajo las condiciones reales o simuladas antes de elegir la resina adecuada. Si hubiera disponibilidad de tiempo, es recomendable que las muestras sean evaluadas de en periodos de 1 a 3 meses y, cuando los resultados lo requieran, cada 6 meses.

Los tipos de resina más usados y que proporcionan distintos grados de resistencia química son:

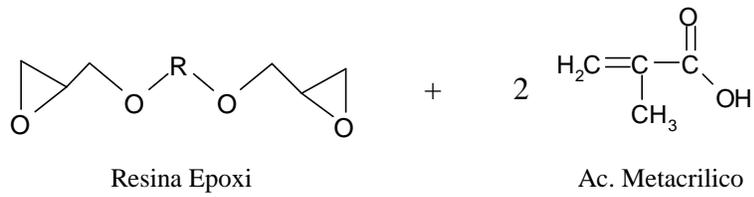
Ortoftálica – baja resistencia química

Isoftálica, tereftálica – resistencia química media

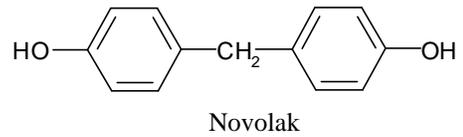
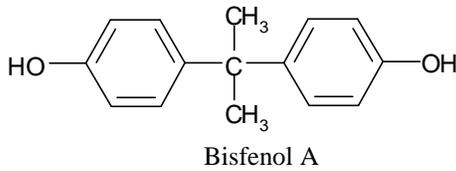
Bisfenol, viniléster, furánica y epoxi – alta resistencia química

Ensayos de laboratorio de diversos fabricantes y usos industriales han indicado que las resinas epoxi viniléster pueden ser usadas en muchas aplicaciones sometidas a varias combinaciones de ácidos, químicos orgánicos halogenados, sosa cáustica y solventes. Las resinas termoestables viniléster son relativamente recientes y están llamadas a tener un gran desarrollo. Estas resinas son el resultado de una poliadición de resina epoxi sobre el ácido insaturado acrílico o metacrílico.

Las resinas epoxi viniléster se obtienen de la reacción:



R puede ser Bisfenol A o Novolak



Obsérvese que solamente existen dobles enlaces al final de la molécula, para poder formar posteriormente una reticulación.

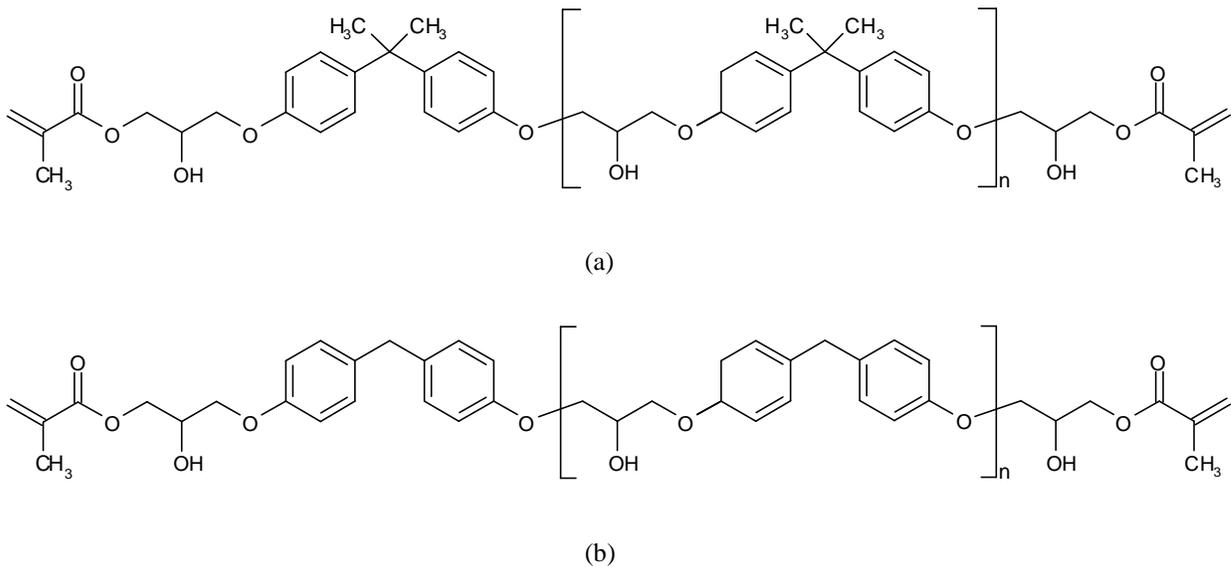


Figura 4.5. Estructuras de matrices de viniléster basadas en un epoxi (a) bisfenol – A y (b) novolak.

El motivo de usar bisfenol A o novolak para la condensación de las resinas viniléster es debido a que estos productos dan la suficiente resistencia en las cadenas. El bisfenol da productos más tenaces, mientras el novolak nos proporciona resinas que presentan una mayor resistencia a la temperatura. Se

presentan en disolución con un 30 – 40% de monómero reactivo, generalmente estireno, y se utilizan de la misma forma que las resinas de poliéster con los mismos aceleradores y catalizadores.

Las principales características de este grupo de resinas son:

- Buenas cualidades mecánicas y, de forma particular, excelente resistencia a la fatiga.
- Excelente fluidez, que facilita su impregnabilidad y moldeo.
- Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, debido a los grupos hidroxilos sobre las ramificaciones de la cadena
- Buena resistencia al fuego, que se puede mejorar por modificación de la molécula viniléster mediante átomos de cloro o bromo, obteniendo resinas autoextinguibles.
- Resistencia a la corrosión, incluso en agua caliente.

El ataque químico en algunas resinas se da a través de la hidrólisis de los grupos de éster, o por la desintegración de los dobles enlaces carbono-carbono no reaccionados por oxidación de los mismos. Por ejemplo, en las resinas poliéster bisfenólicas e isoftálicas, los enlaces con éster ocurren a lo largo de toda la cadena molecular, volviéndolas más susceptibles al ataque químico, sobretodo por oxidación. En las resinas viniléster, los dobles enlaces se sitúan en el extremo de la cadena molecular y reaccionan completamente en la polimerización, dándole mayor resistencia química a la estructura. De manera que son menos susceptibles a los efectos del agua cuando se utilizan catalizadores solubles en orgánicos como peróxido de benzoilo.

En las resinas viniléster no se da la absorción, y por ello, no afecta el endurecimiento. Dado que la instauración viniléster es terminal, los dobles enlaces carbono-carbono son extraordinariamente activos. En consecuencia, las resinas viniléster endurecen de manera rápida y consistente, brindando una rápida resistencia mecánica inicial y una superior resistencia a la deformación plástica (“creep”). Los grupos de hidrófilos secundarios en las moléculas viniléster tienen también un efecto beneficioso en la calidad de los laminados. Dichos grupos reaccionan con los grupos de hidrófilos de la superficie de las fibras de vidrio, resultando en excelentes humectación y adherencia de las fibras de vidrio.

Ya que sólo tienen enlaces cruzados terminales, los materiales compuestos fabricados con resinas viniléster poseen una cadena molecular que en toda su longitud se encuentra libre para estirarse cuando se ve sometida a esfuerzos para absorber el choque mecánico o térmico. El resultado final es un

material flexible, altamente resistente a las fisuras superficiales o en todo su espesor durante el transporte, la instalación y la vida útil del material.

Las resinas viniléster más utilizadas comercialmente son las que se listan a continuación, las cuales poseen diferentes combinaciones con otros grupos funcionales:

- A.- Resinas epoxi viniléster basadas en resina epoxi de tipo bisphenol-A. Resisten a una amplia gama de ácidos, de álcalis, de agentes blanqueadores y de disolventes, empleadas en numerosas aplicaciones de transformación de productos químicos. Ofrecen también una tenacidad y una resistencia excelentes a la fatiga.
- B.- Resinas epoxi viniléster basadas en resina epoxi de tipo bisphenol-A, de bajo contenido en estireno y dotadas de propiedades mecánicas, térmicas y químicas intermedias entre las resinas del inciso A y las del inciso C. Sus combinaciones únicas de coeficiente de dilatación térmica elevado y elongación elevada hacen que estas resinas sean las preferidas para las aplicaciones que sufren un ciclo térmico (cubas o depósitos de reacción química, por ejemplo).
- C.- Resinas epoxi viniléster basadas en epoxy-novolak diseñadas para ofrecer propiedades excepcionales de resistencia térmica y química, resistencia elevada a los disolventes, a los ácidos y a las sustancias oxidantes como el cloro gas. Mayor y constante resistencia a temperaturas elevadas, por eso son las resinas preferidas para las aplicaciones que están en contacto con gases de combustión.
- D.- Resinas epoxi viniléster bromadas que ofrecen un grado elevado de retardancia al fuego. Muy resistentes a la corrosión química del cloro y de los agentes blanqueadores. El bromo que contienen les permite ser más tenaces y resistentes a la fatiga que las resinas epoxi vinil éster standard.
- E.- Resina epoxi viniléster novolak bromada que ofrece un grado elevado de retardancia al fuego. De toda la gama, es la resina más resistente al cloro gas, a los agentes de blanqueadores y a los gases de combustión húmedos.
- F.- Resina epoxi viniléster de tipo bisphenol-A modificada con un elastómero. Tenacidad y resistencia muy elevadas a los choques, a la fatiga y tiene una excelente adherencia. Es la mejor resina para las aplicaciones estructurales exigentes y para la realización de imprimaciones.

En la tabla 4.1 se enlistan las temperaturas máximas de operación para cada una de las resinas anteriores en presencia de diferentes ambientes químicos. Se puede observar que las resinas más resistentes en presencia de ácido sulfhídrico son las del tipo B, C y E; pero si observamos bien la tabla nos podemos dar cuenta que las resinas del tipo C son las que mejor comportamiento en todos los ambientes químicos reportados. Tomando en cuenta, que nunca antes se ha llevado a cabo la fabricación de un digestor anaerobio utilizando un material compuesto de matriz polimérica, es recomendable que se utilice la resina de tipo C, ya que, como mencionamos es la que presenta mejor comportamiento en todos los ambientes químicos. Por lo tanto el reactor digestor anaerobio se fabricaría por el método de enrollamiento continuo con fibra de vidrio y matriz epoxi viniléster basada en epoxi-novolak.

TABLA 4.1. Temperaturas máximas de operación de distintas resinas en varios ambientes químicos.

Ambiente químico	Concentración %	A °C	B °C	C °C	D °C	E °C	F °C
Ácido acético	0.5 – 25	100	100	100	100	100	65
Ácido acético	26 – 50	80	80	80	80	80	
Ácido acético	51 – 75	65	65	65	65	65	
Ácido acético	76 – 85	45	45	45	45	45	
Ácido acético, glacial	100	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Acetona	10		80	80	80	80	
Acetona	100	NR	NR	UL	NR	NR	NR
Ácido clorhídrico	1 – 20	80	105	110	100	105	80
Ácido clorhídrico	21 – 25	65	80	100	80	80	80
Ácido clorhídrico	26 – 30	65	80	95	80	80	80
Ácido clorhídrico	31 – 32	65	70	80	65	80	65
Ácido clorhídrico	33 – 34	50	50	70	50	70	50
Ácido clorhídrico	35 – 36	50	50	60	50	60	50
Ácido clorhídrico	37	40	45	50	40	50	
Ácido sulfhídrico	5	100	175	175	100	175	80
Ácido sulfhídrico, acuoso	toda	100	100	100	100	100	80
Ácido sulfhídrico, gas seco	100	100	110	110	100	110	80
Ácido sulfúrico	0.5 – 25	100	105	105	100	105	80
Ácido sulfúrico	26 – 50	100	100	100	100	100	80
Ácido sulfúrico	51 – 70	80	80	80	80	80	80
Ácido sulfúrico	71 – 75	40	50	80	40	50	40
Ácido sulfúrico	76 – 80	40	40	50	40	40	
Ácido sulfúrico	> 80	NR	NR	UL	NR	UL	NR
Agua destilada	100	80	80	80	80	80	80
Diesel	100	80	100	100	80	100	65
Etanol	10	50	50	65	50	50	50
Etanol	50	40	40	65	40	40	NR
Etanol	90 – 95	25	25	40	25	25	NR
Etanol	100	NR	UL	40	NR	25	NR
Etilenglicol	100	100	100	100	100	100	65
Fuel Oil	100	80	100	100	80	100	65
Gasolina (Sin plomo)	100	50	65	65	50	65	
Heptano	100	100	100	100	100	100	80
Hexano	100	70	70	70	70	70	
Keroseno	100	80	80	80	80	80	65
Metanol	5	50	50	50	50	50	50
Metanol	20	NR	30	40	NR	40	NR
Metanol	40 – 100	NR	UL	40	NR	NR	NR
Nafta	100	80	100	100	80	100	80
Naftaleno	100	100	100	100	100	100	80
Petróleo crudo	100	100	120	120	100	120	65
Tolueno	100	25	40	50	25	40	NR
Xileno	100	25	40	50	25	50	NR

La concentración está reportada en % peso.

En la tabla de resistencia química, un espacio blanco indica simplemente que no existen todavía datos disponibles.

NR: No Recomendado, cualquiera que sea la temperatura.

UL: Utilización Limitada. Duración de 3 días a 1 año a temperatura de ambiente (máxima de 40°C). En general, en los casos en que está indicado UL, las resinas citadas pueden utilizarse para fabricar un PRFV expuesto accidentalmente y momentáneamente en semejante medio. Se recomienda realizar una limpieza y una inspección después de 3 días de contacto.

CONCLUSIONES.

Si comparamos al acero inoxidable AISI 304 con el material compuesto de matriz epoxi vinil ester reforzado con fibra de vidrio; podemos observar que el desempeño del acero en el proceso anaerobio de tratamiento de aguas es deficiente. Por el contrario el material compuesto seleccionado sería una opción más adecuada para las condiciones del proceso. El material compuesto de matriz polimérica tiene una gran resistencia química y no se ve afectado por la biocorrosión. En presencia de biocorrosión el tiempo de vida útil del acero inoxidable AISI 304 es menor; en cambio, el material compuesto de matriz epoxi vinil ester garantiza una vida útil de por lo menos 24 meses.

También podemos concluir que la mayoría de las soluciones comúnmente recomendadas por diversos manuales e investigadores al problema de la biocorrosión, no son viables para el proceso anaerobio de tratamiento de aguas, ya que en ellas se propone el uso de agentes fungicidas y antibacteriales, los cuales destruirían a los microorganismos responsables de la digestión anaerobia. Además proponen después del uso de estos antibacteriales, cambiar el acero AISI 304 por un acero AISI 316 el cual posee casi la misma composición química del 304, con la diferencia de contar con un 3% de Molibdeno adicional. Esto además de implicar un gasto mayor, significaría un gasto innecesario ya que este acero no evita la presencia de la biocorrosión, solo la retarda.

Si bien el costo del material compuesto es mayor que el del acero, la utilización de un material compuesto de matriz polimérica en la fabricación de un digestor anaerobio, resulta más adecuada que la utilización de acero inoxidable AISI 304. El material compuesto permite reducir de manera importante los gastos de mantenimiento, aumenta el tiempo de vida útil y la seguridad, las ventajas del material compuesto de matriz polimérica pueden valorizarse en términos de beneficios con el uso y la inversión inicial se recupera en poco tiempo.

En realidad, la elección de los materiales compuestos representa siempre para el ingeniero un salto tecnológico. Los materiales compuestos ofrecen, efectivamente, la posibilidad de realizar un producto específicamente adaptado a las propiedades solicitadas y optimizar la dupla precio/servicio.

Los materiales compuestos disponen de ventajas con relación a productos competidores, aportando numerosas cualidades funcionales: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, libertad de formas. Su uso permite aumentar la vida útil de ciertos equipos gracias a sus propiedades mecánicas (rigidez, resistencia a la fatiga) y también gracias a sus propiedades químicas

(resistencia a la corrosión). También refuerzan la seguridad gracias a una mejor resistencia a los impactos y al fuego, ofreciendo un mejor aislamiento térmico o fónico y, para algunos de ellos, eléctrico. También enriquecen las posibilidades de diseño, permitiendo aligerar estructuras y realizar formas complejas, aptas para cumplir varias funciones.

Se han logrado describir durante el desarrollo de esta tesis, la gran cantidad de ventajas y aplicaciones de los materiales compuestos de matriz polimérica. Para los ingenieros químicos los materiales compuestos, no solo pueden representar una solución sino, una oportunidad de desarrollo profesional convirtiéndose en los proveedores de estas soluciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Ashland. Composite Polimers: Chemical Resistance Guide. Ashland Inc., Ohio, 2005.
- Askeland, D. Ciencia e Ingeniería de los materiales (4ª ed.). Thomson, México D. F., 2004.
- Chawla, K. Composite Materials: science and engineering. Ed. Springer, New York, 1998.
- Derakane News. Vol. 21. n 1. Marzo de 2002. Michigan.
- Derakane News. Vol. 21. n 5. Noviembre de 2002. Michigan.
- Gay, D. Composite Materials: Design and Applications. CRC Press. LLC, Florida, 2003.
- Griebe, T. Biofilms: Investigative Methods and Applications. Ed. Technomic, Pennsylvania, 2000.
- <http://nobelium.berkeley.edu/%7Elpruitt/me223/dbase.html>
- <http://www.corrosioncost.com>
- <http://www.idesinc.com/Products%5Fl.html>
- Long, A. Design and Manufacture of Textile Composites. Woodhead, Cambridge, 2005.
- Mallick, P. K. Composite Materials Technology. Oxford University Press, New York, 1990.
- Matthews, F. Composite Materials: Engineering and Science. CRC Press. LLC, Florida, 2000.
- Miravete, A. Materiales Compuestos Vol. I. INO Reproducciones, S. A., Zaragoza, 2000.
- Miravete, A. Materiales Compuestos Vol. II. INO Reproducciones, S. A., Zaragoza, 2000.
- Sánchez, A. Sistemas de tratamiento anaerobio de los efluentes de una cervecería. UNAM. Tesis Licenciatura, Cuautitlán, 2003.

Schaffer, J. Ciencia y diseño de materiales para ingeniería. Ed. Continental, México, 2004.

Videla, H. Manual of Biocorrosión. CRC Press. LLC, Florida, 1998.

Zayas, J. Tratamiento anaerobio de aguas residuales. IMTA, México, 2002.