

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

El plástico en la Arquitectura.

Materiales compuestos y Evaluación no Destructiva.

Que presenta:

Emmanuel T. Carballo Gutiérrez.

**UNAM**  
**POSGRADO**  
**arquitectura**



Octubre MMVIII.





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.

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA



El plástico en la Arquitectura.

Materiales compuestos y Evaluación no Destructiva.

Tesis que para obtener el grado de Maestro en Arquitectura

Campo de conocimientos Tecnología

presenta:

Emmanuel T. Carballo Gutiérrez.



2008

Director de tesis.

Mtro. Francisco Reyna Gómez

Sinodales.

Dr. Álvaro Sánchez González.

Mtro. Jorge Rangel Dávalos.

Dr. Agustín Hernández Hernández.

Dr. Miguel Eguiluz Senior.

## Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Dirección General de Estudios de Posgrado, junto con la Subdirección de Cooperación Académica y a la Universidad de Granada.

A todos mi profesores por su apoyo y estímulo.

A mi familia y a todos por los que es posible este trabajo.

Y a todos los que, aun sin palabras, saben que estoy agradecido.

## Índice.

Introducción.	
1. Polímeros.	
Definición.	6
Clasificación de polímeros.	7
Aplicaciones y desarrollo.	8
2. Materiales Compuestos.	
Definición.	10
Componentes de los materiales compuestos.	16
Procesamiento.	19
Propiedades.	22
Características físicas para su uso en la construcción.	24
3. Mecanismos de Falla.	
Definición.	26
Modelos de predicción a fatiga y vida remanente.	33
Método de Elementos Finitos.	38
4. Materiales Compuestos en la Construcción.	
Sistemas Constructivos.	40
Concreto reforzado con FRP	45
Construcciones destacadas.	46
5. La Industria.	
Delimitación.	53
Factores económicos.	58
6. Normatividad.	
Códigos y Estándares.	60
7. Evaluación no Destructiva.	
Definición.	66
8. Problema Inverso.	
Delimitación del problema.	73
9. Conclusiones.	81
Bibliografía.	85

# Introducción.

Este documento representa la investigación realizada en el transcurso de tres semestres en el Posgrado de Arquitectura de la UNAM y un semestre de intercambio académico en la Universidad de Granada, España (UGR); pretende ser una aproximación desde un punto de vista arquitectónico a los materiales compuestos, a sus mecanismos de falla y a la predicción de su vida remanente a través de la evaluación no destructiva para los iniciados en estos temas, además de presentar una aportación en el rubro de las pruebas necesarias para la definición de las propiedades de los materiales compuestos para lograr una implementación mas extendida en la industria de la construcción y dar paso a la creación de una normativa a nivel nacional.

Para el desarrollo de esta investigación se aplicará principalmente el Método Sistémico, el cual busca descubrir las relaciones entre modelos aplicables y transferibles entre diferentes campos de conocimiento encontrando la articulación entre un campo y otro, en este caso se busca la unión entre el campo tecnológico de la construcción junto la aplicación de nuevos materiales y su relación con la utilización y creación de dichos materiales en otros campos de la ciencia y tecnología, tales como la química, la industrialización en serie, la aeronáutica e ingeniería naval.

Partiendo de esta metodología se formulan las necesidades que debe de satisfacer el material, así como el origen de las mismas apoyándose en el Método Histórico y Prospectivo para establecer las fuentes de información y definir los escenarios posibles y deseables en que se insertará el resultado de la investigación.

Para después utilizar la Analogía Histórica partiendo del supuesto de que el comportamiento futuro de las variables obedecerá a ciertas pautas observadas en el pasado en una serie de datos conocidos, para desarrollar por medio de la creación de una comparativa entre las diversas aplicaciones de los materiales compuestos en varios ámbitos y su utilización en la construcción. Además basándome en aplicaciones de otros materiales en circunstancias semejantes a las que en este momento se encuentran los materiales compuestos generar una visión futura deseada en la que se insertarán y poder anticiparse a dicho desarrollo.

Todo esto para definir fortalezas y debilidades de la propuesta y poder predecir y definir qué camino es el más adecuado para el desarrollo de la investigación y los resultados obtenidos sean aplicables a nuestro contexto nacional con una mayor eficiencia. Y concluir con el Método Científico para recolectar y comprobar los datos y las proposiciones desarrolladas.

El interés por este tema surge debido que la arquitectura y los arquitectos parecemos en exceso atados por la tradición, siendo todavía en la actualidad tabiques, cemento, cal y yeso, acompañados por madera y algún otro material artesanal, los que constituyen la masa fundamental de toda la construcción que cubre el planeta, y dado el amplio desarrollo tecnológico que se ha alcanzado, no sólo es viable sino necesaria la investigación de nuevos materiales para la ejecución de una arquitectura que exprese la modernidad desde los procesos de creación de materiales, su manejo en obra y su integración a una estética de diversas formas y aplicaciones.

La revolución de los plásticos sintéticos y la arquitectura es una intensa relación entre los aspectos meramente técnicos, que establecen los ámbitos de aplicación del nuevo material por aproximaciones sucesivas, y las connotaciones semánticas, construidas en el ámbito de la cultura, que han ido condicionando de manera directa el modo en el que los arquitectos nos acercamos a los plásticos. Es en un entramado de relaciones complejas entre hallazgos en el campo de la ciencia de los materiales y las asociaciones culturales que nuestra sociedad ha ido estableciendo a través de determinados productos o aplicaciones. Tan importantes son los sucesivos descubrimientos de polímeros cada vez más avanzados y la puesta en uso de sus procesos de fabricación asociados así como la relación con las aspiraciones colectivas de la sociedad de una determinada época.

El uso del plástico está ampliamente aceptado en otros sectores, como es el de los electrodomésticos, los juguetes y el mobiliario, la industria aeronáutica y automotriz, pero en arquitectura, tras aquél comienzo vigoroso, de gran optimismo hacia el futuro, en el que se proyectaron interesantes prototipos de vivienda prefabricada, módulos multifuncionales, se pasó a un periodo de falta total de propuestas.

Hasta hace algunos años las industrias del mundo han utilizado materiales baratos que se encuentran en la naturaleza -hierro, yeso, concreto, madera- y los productos de la industria se han diseñado de acuerdo con las propiedades de estos materiales. Se han introducido numerosas modificaciones para obtener mejores rendimientos o propiedades distintas, pero ahora se está viviendo una época en la que cada vez se usan



menos estos materiales naturales, porque las características de ciertas sustancias artificiales, como los plásticos, se ajustará por completo no sólo al rendimiento del producto terminado en uso, sino también a su comportamiento durante el proceso de fabricación y costos. En general se crean aquellos materiales que se presten a la fabricación en serie, cuya eficiencia se vería muy limitada si tuviera que conformarse con las propiedades de los materiales naturales.

Los plásticos, como cualquier material nuevo, empezaron intentando abarcar todas las posibilidades formales, aplicaciones y usos, pero su utilización ha ido decantando aquellas utilizaciones idóneas para cada tipo de polímero. Para piezas de tamaño pequeño y poco peso, la utilización del plástico es determinante, y si además, tenemos en cuenta el precio, no existe competencia posible. Los laminados también presentan un campo de utilización donde los materiales plásticos se encuentran muy a la mano, junto con el campo de las pinturas, adhesivos y aditivos, sin olvidar que los materiales aislantes, tanto térmicos como acústicos, están rodeados de diversos tipos de plásticos.

Es probable que la segunda mitad del siglo XX y el siglo XXI sean conocidos como la época de los productos sintéticos, es decir, de los plásticos, las fibras artificiales, los cauchos sintéticos, los materiales compuestos y los adhesivos sintéticos. Desde hace aproximadamente 100 años se ha ido creando una industria masiva que simboliza al siglo XX del mismo modo que el hierro y el acero caracterizaron al siglo XIX (Miravete, 1995; Barbero, 1999). Así pues, se ha registrado una clara tendencia a elevar el uso de esta clase de materiales y se prevé un mayor aumento para los próximos años (ANAIP, 2004; López, 2002).

Los materiales compuestos o "composites" se han convertido en un elemento muy común en nuestras vidas sin apenas darnos cuenta. En el sector aeronáutico y automotriz la utilización de materiales compuestos está muy expandida. Es muy usual encontrar elementos aeronáuticos y de otros medios de transporte fabricados con estos materiales, y esto es una señal clara del aporte de propiedades mejoradas de los "composites" respecto de los considerados materiales tradicionales (Linda y Clements, 2004).

Así pues, durante el siglo XX la ciencia de los materiales ha avanzado con la incorporación de productos sintéticos al mercado industrial. Estos avances han sido bien aprovechados por sectores innovadores como el automotriz o la aeronáutica, pasando muchos de los considerados nuevos materiales a formar parte de objetos cotidianos de nuestras vidas (Juvandes et al., 1996). Esta inmersión y sustitución, más o menos

progresiva de materiales tradicionales por nuevos materiales con mejores prestaciones, como los materiales compuestos, no se ha efectuado de forma pronunciada en el sector de la construcción (Sedó, 2000).

La historia de la utilización de polímeros y materiales compuestos para la construcción se inicia de forma muy esporádica y concreta durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se produjo un rápido progreso con la fabricación de las primeras casetas para equipos de radares electrónicos. Se utilizó el poliéster reforzado con fibra de vidrio debido a su transparencia ante las ondas electromagnéticas. A finales de la década de los 40 se continuó utilizando este material, pero era un material caro. No obstante, el atractivo del material compuesto por su facilidad para tomar formas complejas en su moldeado, fue reconocido rápidamente por los diseñadores y a comienzo de los cincuenta se utilizaba para fabricar láminas translúcidas. De todas maneras su producción era muy limitada debido a las pocas aplicaciones que se le daban.

El principal crecimiento en interés e investigación con respecto al material compuesto de fibra de vidrio y poliéster para la industria de la edificación y la construcción comenzó en los 60 (Mansó, 2004). Se realizaron estudios de procesos para construir paneles grandes de fachadas y sistemas de placas onduladas. Siendo aún su producción muy limitada y su uso considerado como secundario y minoritario. Esta situación se ha mantenido hasta la actualidad en que el uso de materiales compuestos en la construcción en general se centra en aplicaciones en la ingeniería civil para la construcción de puentes, y elementos secundarios de la edificación. Aún así, cabe señalar que el uso en la construcción de estos materiales en las dos últimas décadas ha crecido de forma considerable, aunque también es cierto que se partía de una situación muy retrasada (Sobrino y Pulido, 2004). El uso del concreto armado y del acero para elementos principales resistentes críticos, se encuentra muy arraigado entre la mayoría de los distintos agentes participantes en la construcción.

Se puede decir, por tanto, que desde hace algo más de un siglo, la investigación arquitectónica ha estado dominada por la búsqueda y aplicación de nuevos materiales que han permitido a arquitectos e ingenieros proponer otros métodos y modelos constructivos.

La investigación para el desarrollo de nuevos materiales y la mejor aplicación de los ya existentes debe ser un medio para asegurar que el país alcance niveles adecuados de industrialización, así como, lograr que los beneficios del avance científico y tecnológico se extiendan a todos los ámbitos de la cultura y sociedad.

Además la inspección de infraestructura civil construida con materiales compuestos ha motivado que muchos investigadores en diferentes campos de la ingeniería estructural desarrollen herramientas de evaluación no destructiva, destinadas a asegurar la integridad física de estos componentes. Estos sistemas incluyen varios métodos de detección de daños, tales como la inspección visual, radiografía, corrientes de Eddy, rastreo ultrasónico, termografía infrarroja y análisis ópticos entre otros.

El notable avance experimentado durante la última década en el desarrollo de sistemas de visualización ultrasónica, con especial incidencia en el sector de la evaluación no destructiva en la industria, se ha concretado en la generación de nuevos equipos cada vez más potentes y especializados.

La meta que se quiere alcanzar con esta investigación es lograr fomentar el uso de los materiales compuestos en la arquitectura, tomando el problema desde el punto de vista de las pruebas necesarias para crear una normatividad y estándares necesarios para que se pueda dar una aplicación masiva de los materiales.

El *objetivo principal* es la investigación, desarrollo y aplicación de nuevos procedimientos y sistemas para la visualización de la estructura interna de cuerpos opacos, específicamente materiales compuestos reforzados con fibras, buscando la detección de posibles anomalías ocultas y/o defectos de pequeñas dimensiones. La *vía utilizada* para ello es la síntesis y procesado de descargas ultrasónicas de corta duración con características optimizadas para el estudio de inspección específico.

Buscando como consecuencia las mejoras necesarias en calidad y/o velocidad de formación, de las trazas de las imágenes resultantes en los barridos ultrasónicos implicados; y desde un punto de vista *práctico*, también se busca reducir la complejidad y costo de las tecnologías resultantes para posibilitar el diseño y implantación industrial de nuevos equipos de Inspección y Evaluación No Destructiva con altas prestaciones en resolución de imagen y capacidad de detección, como respuesta a requerimientos específicos de empresas del sector que no encuentren una solución adecuada a partir de los equipos comerciales disponibles.

# Polímeros.

## Definición.

Los polímeros se producen por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas. Existen polímeros naturales como el algodón, formado por fibras de celulosas. La celulosa se encuentra en la madera y en los tallos de muchas plantas, y se emplean para hacer telas y papel. La seda y la lana son otros ejemplos.

Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

Un polímero (del griego poli, muchos; meros, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de mas bajo peso molecular es el monómero. Si el polímero es rigurosamente uniforme en peso molecular y estructura molecular, su grado de polimerización es indicado por un numeral griego, según el número de unidades de monómero que contiene; así, hablamos de dímeros, trímeros, tetrámero, pentámero y sucesivos. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades.

Si el número de unidades es muy grande, se usa también la expresión gran polímero. Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que todas tengan la misma composición química y la misma estructura molecular. Hay polímeros naturales como ciertas proteínas globulares y polícarbohidratos, cuyas moléculas individuales tienen todas el mismo peso molecular y la misma estructura molecular; pero la gran mayoría de los polímeros sintéticos y naturales importantes son mezclas de componentes poliméricos homólogos. La pequeña variabilidad en la composición química y en la estructura molecular es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas ocasionales, variaciones en la orientación de unidades monómeros y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades en los copolímeros. Estas variedades en general no suelen

afectar a las propiedades del producto final, sin embargo, se ha descubierto que en ciertos casos hubo variaciones en copolímeros y ciertos polímeros cristalinos.

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una muy buena resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases. Las más comunes, denominadas Fuerzas de Van der Waals.

## Clasificación de los polímeros.

Según el origen:

- Polímeros Naturales: Son los que se pueden presentar en la naturaleza (reino vegetal y animal), por ejemplo: la celulosa, el caucho natural, las resinas, etc.
- Polímeros Semi-sintéticos: Son los obtenidos por transformación química de los polímeros naturales, sin que se destruya de modo apreciable su naturaleza macromolecular. Ej. la seda artificial obtenida a partir de la celulosa.
- Polímeros Sintéticos: Son los que se obtienen por vía puramente sintética a partir de sustancias de bajo peso molecular. Ej. el Nylon.

Según la estructura molecular:

- Polímeros Lineales: Formados por largas cadenas de macromoléculas no ramificadas.
- Polímeros Ramificados: Están constituidos por macromoléculas en las que la cadena principal presenta una serie de ramificaciones laterales.
- Polímeros Reticulados: Están formados por macromoléculas con cadenas y ramificaciones entrelazadas en las tres dimensiones del espacio.

Según las reacciones de formación:

- Poliadicionados: Son polímeros cuyas macromoléculas se han formado por unión de moléculas monómeras no saturadas. Ej. el polietileno.
- Polímeros Policondensados: Son polímeros cuyo enlace entre las macromoléculas son multifuncionales, con separación de algún producto de bajo peso molecular. Ej. Nylon, las proteínas.
- Polímeros Poliaductos: Son aquellos cuyo enlace entre las macromoléculas son multifuncionales, sin separación de moléculas sencillas. Ej. Poliuretanos y resinas.

Según su aplicación:

- Polímeros de uso general, como el PVC, PS, poliacrilatos y polimetacrilatos, resinas epoxi, etc.
- Polímeros técnicos o de ingeniería, que preservan sus propiedades por debajo de 0° C y por encima de 100° C, como policarbonatos, poliamidas, polisulfonas, etc.
- Polímeros especiales, polímeros especiales, de alto precio con altas prestaciones en cuanto a sus propiedades térmicas y mecánicas, normalmente con aplicaciones muy específicas. Es aquí donde se están realizando los avances más sobresalientes: polímeros fluorados como el teflón muy resistentes incluso a altas temperaturas, cristales líquidos empleados en las pantallas planas de cualquier pantalla o televisor, polímeros electroactivos que conducen electricidad en lugar de servir como aislantes, polímeros fotosensibles, o biopolímeros cada vez más empleados en cirugía y en prótesis.

## Aplicaciones y desarrollo.

Actualmente se apunta a los polímeros como una de las áreas prioritarias de desarrollo mundial. Siendo las líneas de investigación más destacadas las siguientes:

- Diseños en la estructura molecular para que puedan elegirse y combinarse propiedades y funciones diversas.
- Materiales biocompatibles en el ámbito de la traumatología, odontología, cirugía, etc.
- Procesos de reciclado de plásticos que reduzcan su impacto ambiental.

- Materiales reforzados con una alta resistencia mecánica combinada con otras propiedades y funciones, como los nanotubos de carbono, elementos de dimensiones extraordinariamente pequeñas cuya resistencia es cien veces superior a la del acero.
- Control de la degradación al ser sometidos a condiciones ambientales severas de humedad, temperatura o resistencia al fuego.
- Los plásticos al ser materiales maleables y de baja densidad se emplean en campos muy diversos, como en aeronáutica (convenientemente reforzados con fibras de vidrio o de carbono), en automoción, en telecomunicaciones (fibras ópticas), etc. En el campo de la medicina las aplicaciones son también enormes: implantes, ortopedia, fármacos, para hacer plasma artificial, e incluso algunas proteínas que necesita el cuerpo humano también se pueden sintetizar artificialmente.

# Materiales Compuestos.

## Definición.

En la manera más básica, un material compuesto es el que está conformado de al menos dos elementos que trabajan juntos para producir propiedades físicas que son diferentes a las de los elementos por su propia cuenta. Y de acuerdo con esta definición, el hombre ha utilizado materiales compuestos desde la edad antigua, como con el adobe, formado por una mezcla de arcilla, agua y paja.

Pero el término material compuesto se reserva para aquellos materiales de composición sintética que sus compuestos difieren en su composición, estado y forma, quedando claramente diferenciados, manteniendo sus propiedades por separado (Calama y Gómez, 1996).

En la práctica los materiales compuestos consisten de una materia base (matriz) y un refuerzo de algún tipo, agregado principalmente para la fuerza y la rigidez de la matriz, siendo usualmente este refuerzo en forma de fibras, que estructuralmente son elementos unidireccionales que trabajan a tracción.

La base de los materiales compuestos modernos son los polímeros sintéticos. Partiendo de ellos es posible adaptar y crear nuevos polímeros que pueden ser diseñados para funciones específicas. Se ha desarrollado por ejemplo un tipo de polímeros que no sufren corrosión. Se pueden diseñar polímeros sintéticos con propiedades de rigidez o flexibilidad, transparencia u opacidad, dureza o fragilidad (Miravete, 2000; Mallick, 1997).

Las propiedades de los polímeros sintéticos pueden ser incrementadas en gran medida adaptando técnicas utilizadas por la Naturaleza. Muy pocos materiales naturales consisten en una sola sustancia; la mayoría consisten en una mezcla de componentes diferentes que, al encontrarse unidos, producen un material más capaz de desempeñar su función que una sustancia simple. El hueso, por ejemplo, adquiere su combinación de ligereza y resistencia (o sea, alta resistencia específica) combinando cristales de apatita (un componente del calcio) con fibras de la proteína colágeno. Tales materiales son conocidos como compuestos (Miravete, 1995; Hull, 1996).



Para aplicaciones resistentes, en las que tanto la resistencia como la rigidez del material son críticas, es necesario combinar el polímero con otros materiales para obtener materiales compuestos cuyas propiedades superen las de sus constituyentes (Barbero, 1999). Los componentes más comúnmente utilizados están formados de partículas o en formas fibrosas. En los primeros, las partículas de un material o materiales específicos están adheridos entre sí mediante una matriz continua (el polímero) con un bajo módulo de elasticidad. En los segundos, compuestos fibrosos, son fibras con alta resistencia y rigidez las que están embebidas o adheridas entre sí por la matriz continua de bajo módulo (Miravete, 2000; Tsai, 1992). El refuerzo fibroso puede orientarse en la dirección que sea necesaria para proporcionar la mayor resistencia y rigidez, y gracias a la moldeabilidad del material pueden seleccionarse las formas estructurales que se consideren más efectivas. Para aumentar todavía más la rigidez del material, las unidades estructurales que forman la estructura completa pueden apilarse de manera que la rigidez de la estructura se deriva tanto de su configuración como del material mismo (Revuelta, 2004-2).

Se han realizado estudios de procesos para construir paneles grandes de fachadas y sistemas de placas onduladas, pero aún así su producción siguió siendo muy limitada y su uso considerado como secundario y minoritario en el sector de la construcción. Esta situación se ha mantenido hasta la actualidad. Actualmente el uso de materiales compuestos en la construcción en general se centra sobre todo en algunas aplicaciones en la ingeniería civil para la construcción de puentes, y elementos secundarios de la edificación. Aún así, cabe reconocer que el uso en la construcción de estos materiales en las dos últimas décadas ha crecido de forma considerable, aunque también es cierto que se partía de una situación muy retrasada (Sobrinho y Pulido, 2004). El uso del concreto armado y del acero para elementos principales resistentes críticos, se encuentra muy arraigado entre la mayoría de los distintos agentes participantes en la construcción.

Todo ello deriva en que se ha detectado una falta de estudios e investigación sobre el uso de materiales compuestos avanzados en elementos estructurales y de refuerzo. Evidentemente la base teórico-práctica para estructuras de puentes es aplicable a las estructuras de edificios, aunque es necesaria una adaptación y estudios concretos debido a la diferencia de particularidades del entorno de la obra, la forma de trabajar de los elementos estructurales y la forma de construir. Todo ello puede conllevar un cambio en el sistema constructivo de los edificios industriales debido a la incorporación de materiales compuestos avanzados (Recasens, 2002).

En el sector de la construcción el uso de materiales compuestos avanzados es muy significativo debido a su bajo peso y resistencia elevada en comparación con el acero y el concreto. Gracias a su ligereza, es posible construir de forma más rápida y con menos riesgo, aparte de reducir las cargas muertas del conjunto. El costo es un aspecto que limita su utilización, pero es necesario subrayar que mediante un diseño adecuado y tras evaluar las ventajas económicas que conlleva el uso de estos materiales: ligereza, economía de transporte y montaje, reducción de cargas muertas y mantenimiento prácticamente nulo, el uso de estos materiales podría resultar rentable. La problemática principal del entorno de la construcción respecto a este tipo de materiales es el conservadurismo tradicional del sector (Revuelta, 2004-1).

Para variar esta situación, es necesaria la realización de estudios en los cuales se demuestre la viabilidad técnica de la aplicación de materiales compuestos en la construcción industrial, y comparaciones con los materiales utilizados de forma tradicional dejando constancia de sus, a priori, potenciales ventajas. Ello facilitaría, en gran medida, un mayor uso de estos materiales por los distintos agentes participantes en la construcción.

Actualmente los materiales compuestos o “composites” se pueden clasificar de acuerdo a las características de sus componentes en tres principales grupos:

- Compuestos de matriz polimérica (PMC por sus siglas en inglés). También conocidos como FRP (Fibre Reinforced Polymer). Estos son los más comunes, utilizan una resina a base de polímeros como matriz y una gran variedad de fibras, como la de vidrio, carbón y aramida como refuerzo. En este tipo de materiales compuestos es donde se centrará la investigación.
- Compuestos de matriz metálica (MMC). Se encuentran cada vez mas en la industria de los automóviles, estos materiales usan una matriz como el aluminio y se refuerza con fibras tales como el carburo de silicio.
- Compuestos de matriz cerámica (CMC). Usados en ambientes a muy altas temperaturas, están reforzadas con fibras cortas o barras, como las hechas por carburo de silicio y nitruro de boro.

De los cuales se optó por la investigación de los Compuestos de matriz polimérica debido al potencial de aplicación a largo plazo y a los mercados a los que se está introduciendo. Estos son sistemas de resinas como las epoxi y poliestireno tienen un limitado uso por si solas, debido a que sus propiedades mecánicas no

son tan altas cuando son comparadas a los metales. Sin embargo, tienen propiedades deseables, como la habilidad de ser fácilmente moldeados en formas complejas.

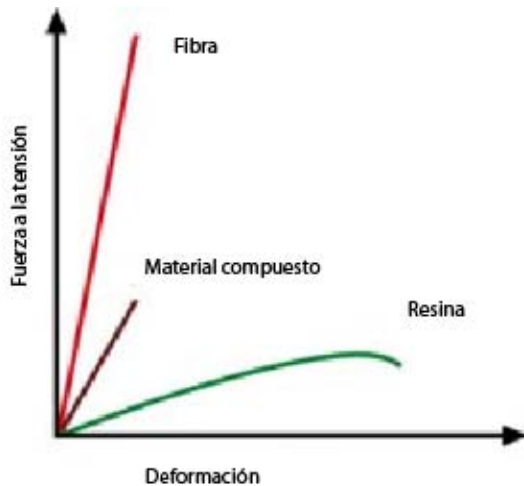
Materiales como el vidrio, la aramida y el boro tienen una resistencia extremadamente alta a la tracción y a la compresión, pero en forma sólida estas propiedades no son aparentes. Esto es debido al hecho de que cuando son tensionadas, fallas aleatorias en la superficie causan que cada material se fracture y falle a puntos más bajos que los puntos de fractura teóricos. Para solucionar este problema, el material es producido en forma de fibra, para que, aunque el mismo número de fallas aleatorias ocurran, serán restringidas a un pequeño número de fibras, mostrando las restantes la fuerza teórica del material. Por lo tanto un conjunto de fibras reflejarán más acertadamente el desempeño óptimo del material. Sin embargo, las fibras solas sólo pueden trabajar a la tracción a lo largo de la longitud de la fibra, de la misma manera que las fibras en una cuerda.

Aquí es cuando el sistema de resinas es combinado con fibras reforzadas de vidrio, carbón y aramida, con lo que se obtienen propiedades excepcionales. La matriz de la resina distribuye las cargas aplicadas al compuesto entre cada una de las fibras individuales y también protege a las fibras de daños causados por la abrasión y los impactos. La alta fuerza y rigidez, la facilidad de ser moldeada en complejas formas, la alta resistencia al ambiente junto con una baja densidad, hacen al compuesto resultante superior para muchas aplicaciones.

Debido a que los compuestos de matriz polimérica combinan un sistema de resinas y fibras de refuerzo, las propiedades del material compuesto resultante combinan ciertas propiedades de la resina y ciertas de las fibras.

En general, las propiedades de los compuestos están determinadas por:

- Las propiedades de la fibra.
- Las propiedades de la resina.
- El porcentaje de fibra en la resina FVF (Fracción de Volumen de Fibra).
- La geometría y orientación de las fibras en el compuesto, junto con el número y orientación de las placas del material.



Grafica representativa de la resistencia individual a la tensión de cada elemento aislado y del material compuesto.

El grado de fibra en la resina deriva en su mayoría del proceso de manufactura usado para combinar la resina con la fibra; sin embargo, también está influenciado por el tipo de sistema de resina utilizado y la forma en la cual las fibras están incorporadas. En general, debido a que las propiedades mecánicas de las fibras son mucho mayores que las de las resinas, mientras mayor sea el porcentaje de fibra mayor serán las propiedades mecánicas del compuesto resultante. Aunque en la práctica hay limitantes de esto, ya que las fibras deben ser completamente cubiertas en la resina para ser eficientes, y habrá una unión óptima generalmente en las fibras de sección circular.

Además de que en los procesos de manufactura utilizados para combinar fibras con resina tienden a variar la cantidad de imperfecciones y las penetraciones de aire. Usualmente, con una mano común en el proceso de lay-up ampliamente usado en la industria de construcción de botes, un límite para la Fracción de Volumen de Fibra es aproximadamente del 30 o 40%, y con una más alta calidad, con procesos mas precisos y sofisticados usados en la industria aeroespacial, la Fracción de Volumen de Fibra puede ser aproximadamente del 70%.

Cuando las fibras, dentro del material compuesto, se encuentran orientadas en una única dirección (presentación industrial conocida como *roving*), nos encontramos con un material anisótropo, obteniéndose la máxima resistencia y módulo en la dirección del eje de las fibras. Una disposición del refuerzo en dos direcciones (presentación denominada *tejido*) produce diferentes resistencias según el ángulo que formen las

fibras. En el caso de que las fibras se encuentren orientadas en todas direcciones (presentación denominada *mats*), el comportamiento del compuesto es isótropo, reduciéndose sustancialmente los valores de la resistencia en relación con los obtenidos en los compuestos tipo roving según la dirección de las fibras.

La geometría de las fibras en un compuesto es también importante, ya que las fibras tienen sus propiedades mecánicas más altas en su sentido longitudinal más que en el transversal. Esto conduce a las propiedades fuertemente anisótropas del compuesto donde, a diferencia de los metales, las propiedades mecánicas de los compuestos son significativamente diferentes cuando son probadas en diferentes direcciones. Esto significa que es muy importante cuando se considera el uso de los materiales compuestos para entender en la etapa de diseño, tanto las magnitudes como la dirección de las cargas aplicadas. Cuando son correctamente aplicadas, estas propiedades anisótropas pueden ser una gran ventaja ya que sólo es necesario colocar material en la dirección y donde las cargas son aplicadas, y así se evita el material redundante.

También es importante denotar que con los metales las propiedades de los materiales están principalmente determinados por el proveedor, y que la persona que utiliza los materiales para construir una estructura terminada puede hacer pocos cambios a estas propiedades “de fábrica”. Sin embargo, un material compuesto se forma al mismo tiempo que la estructura en sí misma es fabricada. Lo que implica que la persona que está haciendo una estructura está creando las propiedades del material compuesto resultante, y así el proceso de manufactura que se usa tiene una parte crítica en la determinación del rendimiento de la estructura resultante.

La forma de los materiales compuestos más usual empleada en aplicaciones estructurales se denomina laminado, constituido por varias laminas de fino espesor. Dependiendo de la orientación de las fibras en cada lámina y de la secuencia de las mismas dentro del laminado se puede generar un amplio rango de propiedades mecánicas y físicas.

## Componentes de los materiales compuestos.

### Matriz (Resinas).

Las resinas que generalmente se utilizan en los materiales compuestos son polímeros, los cuales pueden ser divididos en dos tipos, los termoplásticos y los termofijos, de acuerdo al efecto del calor en sus propiedades.

Los termoplásticos, como los metales, a temperatura ambiente son materiales rígidos, pero al elevar la temperatura se vuelven blandos y moldeables, sus propiedades no cambian si se funden y se pueden moldear varias veces. Entre sus cadenas presentan fuerzas de Van der Waals que, al aumentar la temperatura, se debilitan, y por ello estos plásticos se reblandecen. Comúnmente se usa el nylon, polipropileno y ABS, y estos pueden ser reforzados usualmente son reforzados con fibras cortas, como la fibra de vidrio.

Los materiales termofijos se forman a través de una reacción en cadena in situ, donde la resina y catalizadores son mezclados dando así una reacción química no reversible para formar un producto infusible e insoluble. La razón de tal comportamiento estriba en que las cadenas de estos materiales forman una red tridimensional, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes, así la estructura formada toma el aspecto macroscópico de una única molécula gigantesca, cuya forma se fija permanentemente, debido a que la movilidad de las cadenas y los grados de libertad para rotación en los enlaces es prácticamente nulo.

En algunos termofijos, como en la resina fenólica se producen sustancias volátiles como subproductos (en una reacción de condensación), mientras que otro tipo de resinas, como el poliéster y el epoxy, son curados por mecanismos que no producen subproductos, por lo que es más fácil su producción (por reacción de adición). Una vez curados no serán moldeables por efecto de la temperatura, sin embargo si alcanzan cierto límite sus propiedades mecánicas cambiarán significativamente.

## Refuerzo (Fibras).

El papel principal de los refuerzos en un material compuesto es fundamentalmente el de incrementar las propiedades físicas de la resina, por lo que las propiedades mecánicas del compuesto están dominadas por la contribución de dichos refuerzos.

Los principales factores que gobiernan la contribución de las fibras son:

- Las propiedades mecánicas de la resina en sí misma.
- La superficie de interacción de la fibra con la resina es controlada por el grado de unión que existe entre las dos, que es influenciado por el tratamiento que se le da a la superficie de la fibra.
- La cantidad de fibra que se encuentra en el compuesto, que es principalmente definida por el proceso de manufactura utilizado. Aquí el diámetro de la fibra es un factor importante, debido a que a menor espesor mayor es el costo.
- La orientación de las fibras crea propiedades en una dirección específica en el compuesto, debido a que las fibras de refuerzo son diseñadas para ser cargadas a lo largo de su longitud y no en su espesor.

La Fibra de carbono tienen un diámetro de 7 a 8 micrómetros ( $1 \times 10^{-6}$ ) y se obtienen de una fibra "precursora", que generalmente es el PAN (poliacrilonitrilo) que se somete a diversos procedimientos de transformación, como el estirado u orientación, oxidación, carbonización y grafitización principalmente. De los cuales pueden obtenerse dos tipos de fibras: Fibras HR (de alta resistencia) y Fibras HM (de alto módulo), además de que se encuentran disponibles en varias presentaciones: como Mechas de 500 hasta 100 000 filamentos, Tejidos ya sean unidireccionales o multidireccionales, Tejidos híbridos de vidrio-carbono o aramida-carbono, y los Preimpregnados con epoxi.

Particularmente las Fibras HM tienen un módulo específico 70 veces superior al de las aleaciones de aluminio, además de que tienen un coeficiente de dilatación muy bajo, lo que permite una gran estabilidad dimensional a las estructuras y una conductividad térmica elevada. Aunque también presentan algunos inconvenientes, como su alto costo, una baja resistencia al impacto y las diferencias de potencial, que al estar en contacto con metales pueden favorecer corrosiones de tipo galvánico.

La Fibra de vidrio, que actualmente es la mas utilizada con los compuestos termoplásticos, es vidrio en forma de filamentos, que pueden ser hechos de diversos tipos de vidrio, designados con las letras A, B, ERC, C, D, R y S; los mas comúnmente utilizados para los refuerzos de materiales compuestos son los de tipo E (eléctrico) que se utilizan para la fabricación de fibras continua; R (alta resistencia mecánica y módulo de elasticidad) y C (resistencia química).

Para su fabricación el vidrio es forzado a pasar por unos canales a 1200 °C, obteniéndose las fibras "primitivas" que luego de humidifican, enciman, ensamblan y embobinan. El grosor del filamento se mide en la fibra de vidrio se mide en tex (número de gramos que pesa el hilo por cada 100 metros de longitud), existiendo desde 68 tex hasta 5000 tex con una nomenclatura predeterminada, siendo los mas habituales los 1200 y 2400 tex.

Las presentaciones de la fibra de vidrio se clasifican en:

- Tejido. Que se emplea para conseguir resistencia en dos direcciones.
- Mat. Que es fieltro de hilos continuos o segmentados mantenidos por un adhesivo adaptado al modelo.
- Roving. Son hilos continuos que forman principalmente una hebra.

Las fibras orgánicas se basan en la creación de fibras con una alta resistencia y un alto módulo de elasticidad a partir de la perfecta alineación en el proceso de polimerización, produciendo largas cadenas alineadas y agrupadas estrechamente.

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de Aramida, que es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromática. Estas fibras fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar y actualmente hay dos tipos comerciales: Kevlar 29 y Kevlar 49, diferenciándose en que la primera tiene una densidad baja y resistencia alta aportada por las fibras de aramida, está diseñada para protección balística, cuerdas y cables; mientras que el segundo está caracterizado por una baja densidad, alta resistencia y módulo elástico, utilizada para aplicaciones aeroespaciales, en la industria marina y automotriz.



## Procesamiento.

La elección del procesamiento influye directamente por el tipo de resina utilizado (termoplástico o termofijo) la forma del elemento requerido, el rendimiento objetivo (de mercado masivo o de alto rendimiento) y los requisitos de producción en términos de cantidad.

De forma general, el moldeo de un material compuesto consta de tres fases, que pueden ser simultáneas o separadas en función del procedimiento que se elija (Antequera et al, 1993).

- Impregnación del refuerzo por la resina, que corresponde a la constitución de un material compuesto exento de inclusiones de aire.
- Adaptación de dicho material compuesto a las formas y dimensiones deseadas, con la ayuda de un molde.
- Endurecimiento del material y desmolde de la pieza final.

Estas tres fases pueden realizarse según diferentes procedimientos, cuya elección se efectúa en función de las formas, dimensiones, características mecánicas que se desean obtener y series de fabricación.

**Contacto manual.** El moldeo por contacto manual consiste en aplicar sucesivamente dentro del molde un agente desmoldeante, una película o capa de gel, una capa de resina termoestable líquida, una capa de refuerzo (vidrio, aramida, carbono) en la forma de mat de hilos cortados o de tejido roving, e impregnar el refuerzo con la mano con el auxilio de un rodillo o una brocha. Esta operación se repite tantas veces como sea necesario, hasta obtener el espesor deseado de la estructura.

**Proyección simultánea.** El proceso consiste en proyectar simultáneamente en el molde hilos de fibra cortados, normalmente con 30 mm de largo, y la resina necesaria para su impregnación. Después se presiona con rodillos manualmente para compactar la mezcla resina y fibra en el molde y, si es posible, eliminar las burbujas de aire producidas por el sistema de proyección.

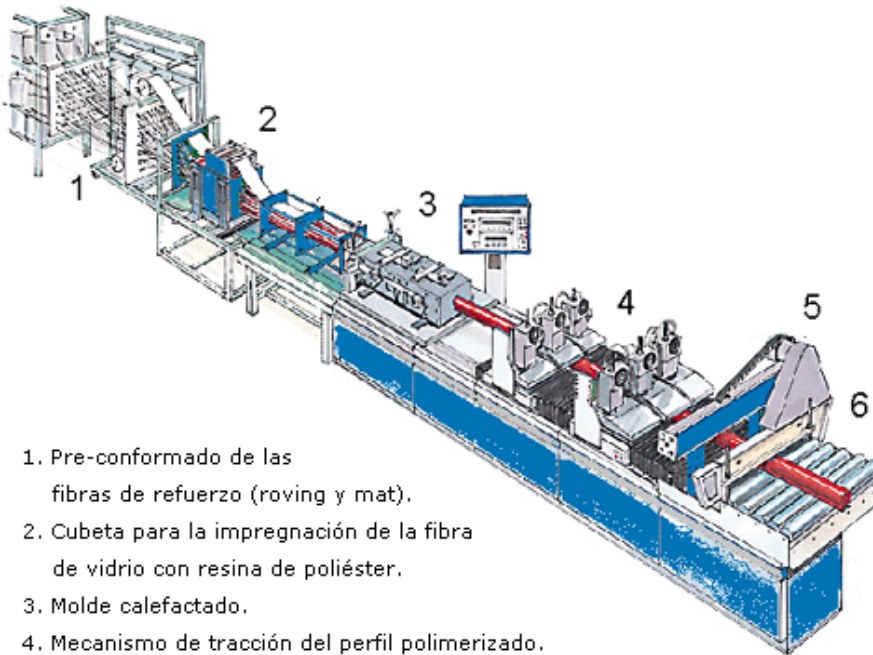
**Proceso de vacío.** El moldeo por vacío combina técnicas de inyección de resina a baja presión con técnicas de vacío, con la particularidad de que este proceso consiste en separar las funciones de cierre del molde y el flujo de resina. El cierre del molde es llevado a cabo por un circuito periférico con alto nivel de vacío. El flujo de resina se obtiene con la inyección a baja presión o aplicando la resina manualmente dentro

del molde, antes que éste se cierre; cuando el cierre ocurre, se crea el vacío dentro de la cavidad del molde. Las resinas aplicadas más comúnmente son los poliésteres con baja viscosidad que pueden ser combinados con cargas minerales.

**Centrifugación.** Es un proceso que permite obtener cuerpos cilíndricos mediante la fuerza centrífuga, los refuerzos aplicados y la resina son introducidos en un molde de metal rotativo y cilíndrico en el que la resina impregna el refuerzo bajo el efecto de la fuerza centrífuga y forma, después de la polimerización, una estructura cilíndrica. Tras introducir los materiales en el molde, la velocidad de rotación aumenta hasta alcanzar la velocidad de moldeado adecuada, dependiendo de varios factores como la cantidad y naturaleza del refuerzo, el espesor y diámetro de la pieza y la viscosidad de la resina.

**Bobinado de filamentos.** Los hilos impregnados son enrollados de forma precisa, y en varias capas, en un mandril rotativo con una máquina automatizada de enrollamiento de hilos. Después, el mandril envuelto con la estructura compuesta es movido, siempre en rotación, para ser polimerizado en un horno (o con luces infrarrojas). Una vez curado, y con la polimerización de la resina termoestable completa, el mandril es removido. A veces el mandril puede ser mantenido como parte del compuesto final.

**Poltrusión.** Es un proceso continuo para producir materiales compuestos con una sección constante. Existen seis partes principales en el proceso de poltrusión: preparación e incorporación de las fibras de vidrio, zona de impregnación de la resina, preformación, molde, mecanismo de tiraje y corte de perfiles. Durante este proceso las fibras de refuerzo son saturadas con la resina en un tanque, mientras son continuamente jaladas por un dado caliente, en el que gradualmente se cura y solidifica para formar un compuesto con la misma sección que el perfil del dado. Debido al continuo movimiento, el proceso de poltrusión es usualmente más difícil de controlar que otro proceso de manufactura "inmóvil", como el proceso de autoclave. La velocidad de jalado comúnmente usada es en el orden de cientos de milímetros por segundo, mientras que el dado de poltrusión mide un metro de largo.



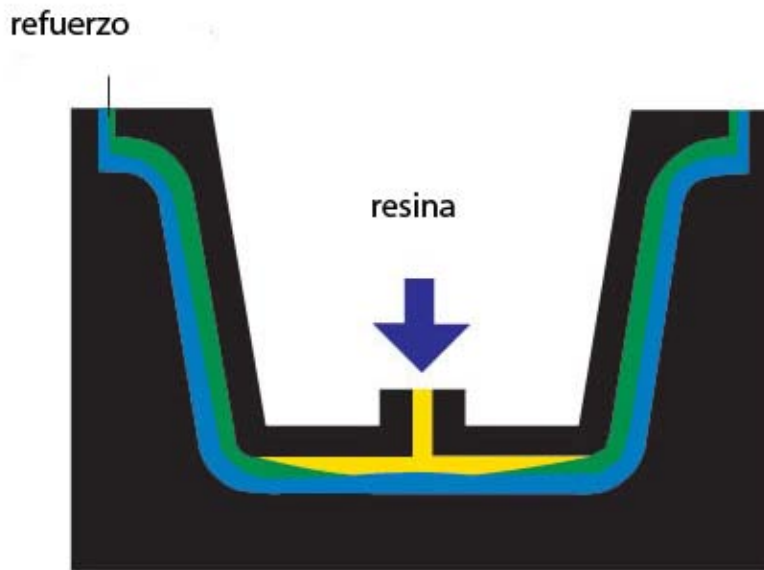
1. Pre-conformado de las fibras de refuerzo (roving y mat).
2. Cubeta para la impregnación de la fibra de vidrio con resina de poliéster.
3. Molde calefactado.
4. Mecanismo de tracción del perfil polimerizado.
5. Grupo de corte y pulido.
6. Control de calidad, identificación y embalaje.

Partes del proceso de poltrusión.

**Modelado por transferencia de resina (RTM).** Es un proceso de molde cerrado en el que se colocan previamente fibras preformadas, para después ser aseguradas con agarraderas para darle forma al componente del material compuesto, entonces la resina se transfiere en la cavidad a través de puertos de inyección a relativamente baja presión (usualmente a menos de 0.7 MPa). Normalmente se utilizan resinas de poliéster, epoxi, fenólicas y acrílicas, además de que es posible utilizar diferentes tipos de moldes, y dependiendo del nivel de producción esperado puede ser aplicado calor al molde para disminuir el tiempo de polimerización y en algunos casos, pueden ser necesarios moldes de acero. Las resinas de baja retracción pueden ser utilizadas en esos moldes para mejorar el acabado de la superficie y la apariencia.

El porcentaje de fibra en el volumen de la preforma dicta tanto la velocidad en la que resina llena el molde junto con el desempeño mecánico del material compuesto resultante. Este proceso ofrece bajos costos de producción de materiales compuestos de gran tamaño y formas complejas, pero su principal desventaja es que a mayores porcentajes de fibras (>50%), como en el caso de los materiales compuestos de alto desempeño, se genera una reducción significativa en la permeabilidad de la preforma, por lo tanto, se reduce el flujo de la resina, lo que implica un mayor tiempo y costo de producción.

## Modelado por Transferencia de Resina



Esquema del proceso RTM.

### Propiedades.

**Propiedades mecánicas.** Dependen principalmente del sistema de refuerzo y, en menor medida, de la matriz, ofreciendo un rango de posibilidades que los hacen susceptibles de ser utilizados tanto en componentes altamente estructurales como en componentes de bajos requerimientos mecánicos.

**Diseño.** Otra característica importante es la absoluta flexibilidad que brindan en cuanto a formas, diseños y acabados (texturas, colores, luminosidad, etc.), incluso para la fabricación de piezas de gran tamaño. Desde el punto de vista eléctrico, y en el caso particular del material compuesto reforzado con fibra de vidrio, constituyen un material con una muy baja conductividad eléctrica, razón por la cual se los utiliza en estaciones de almacenaje, distribución y transporte de electricidad con una alta rentabilidad al eliminar total o parcialmente la necesidad de utilizar aisladores. No presentan ningún tipo de interferencias a las ondas electromagnéticas, lo cual hace que sean utilizados, casi en forma exclusiva, para la ejecución integral de edificios de comunicaciones y transmisiones.

Ligereza. Estos materiales resultan ser de especial interés debido a su ligereza, con densidades que oscilan entre 30 y 200 kg/m<sup>3</sup>, brinda enormes ventajas desde el punto de vista de economía y facilidad tanto del transporte de la pieza hasta la obra como del montaje la estabilidad dimensional, alta durabilidad, resistencia al impacto y baja inflamabilidad. Además permiten, mediante una adecuada elección de resinas y aditivos, una alta flexibilidad en el diseño (Recasens, 2002).

Por otro lado, cuando estos materiales se utilizan de modo integral, se obtiene una reducción importante de las cargas muertas. Además presentan un excelente comportamiento frente a la corrosión y al ataque de agentes ambientales, lo cual supone una gran ventaja en aplicaciones costeras y, en general, en todos aquellos ambientes que sean agresivos, siendo el mantenimiento prácticamente nulo.

Comportamiento frente al fuego. Al utilizar una elección adecuada del sistema resina-aditivos permite conseguir, sin inconvenientes, el rango de M1- F1 (La clasificación de Fuego [M] expresa la resistencia al fuego del producto y la clasificación de Humos [F] expresa, cuantitativa y cualitativamente, los humos generados durante la combustión [toxicidad, opacidad]. Cuanto menor sea el valor del índice [0 a 4], mejor será el comportamiento frente al fuego del producto).

Corrosión. Otro punto importante es su alta resistencia al ataque químico frente al agua u otros productos. Mediante una elección adecuada de la resina, resultan ser prácticamente inertes a diversos agentes químicos, razón por la cual son ampliamente utilizados en tuberías para la industria del petróleo, la industria química o simplemente para el transporte de agua.

Algunas de sus principales desventajas son la falta de experiencia establecida en la industria tanto en la teoría como en la práctica debido al desconocimiento por parte de las constructoras, de los inversionistas y de los usuarios, esto aunado a una falta de normatividad internacional, además del alto costo; pero todo esto se podría compensar combinando el estudio detallado de su comportamiento estructural, con una adecuada monitorización en tiempo real de las estructuras construidas y reforzadas, que permitiría visualizar en todo momento el funcionamiento mecánico y anticipar cualquier daño o fatiga.

## Características físicas para su uso en la construcción.

Para muchas aplicaciones de productos plásticos en construcción, su comportamiento mecánico tiene solo importancia en cuanto a que se garantice suficiente estabilidad en el intervalo de temperaturas a considerar, por medio de una adecuada elección de material y elaboración. El intervalo de temperaturas para utilización exterior en edificios se sitúa entre  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $+60^{\circ}\text{C}$ ; para sótanos y aplicaciones interiores es en general mucho más reducido. El calor específico de los plásticos a  $20^{\circ}\text{C}$  se sitúa en la zona de .25 a .45 kcal/g $^{\circ}\text{C}$ .

El Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua es la resistividad a la difusión del vapor de agua ( $\mu$ ) que tiene un material. Su valor es adimensional y relativo con referencia a la resistividad del aire seco en reposo. Así, los factores  $\mu$  de resistencia a la difusión del vapor de agua de los plásticos macizos se sitúa entre 20 000 y 500 000. La resistencia a la difusión  $\mu$  de las películas de juntas de plástico como barreras de vapor depende de la constitución del material y del espesor, pudiéndose adaptar ampliamente a las necesidades, por ejemplo en cuanto al gradiente de difusión de tejados no aislados. Las espumas de plástico tienen valores de  $\mu$  de magnitud más baja, en la zona de 25 a 300, de modo que en caso de utilización errónea de las capas aislantes se puede formar agua de condensación y rocío en las espumas. La absorción de agua hasta la saturación de los plásticos usados en construcción es despreciablemente pequeña.

Como las materias poliméricas orgánicas no son accesibles a las reacciones iónicas de la corrosión de superficies, la resistencia a la corrosión de la mayor parte de los plásticos es excelente frente a componentes agresivos del agua marina, agua del terreno y aguas residuales de todo tipo, aire marino y atmósferas industriales. Al elegir dispersiones de plástico para la protección de obras hay que tener en cuenta su diversa estabilidad.

La característica común de los productos plásticos para construcción es su contenido en compuestos químicos del carbono con moléculas muy grandes que representan importantes productos de la industria química como materias orgánicas sintéticas macromoleculares. Durante la transformación del petróleo en la petroquímica se obtienen productos de partida como por ejemplo las uniones de resina sintética de reticulación química y física constituyen en conjunto alrededor del 40% de la producción de materias primas plásticas. Por otra parte, las masas plásticas de moldeo que se preparan a partir de polímeros, también con cargas reforzantes, son materias primas para productos plásticos que encuentran aplicación en la

construcción en forma de películas, bandas, baldosas, perfiles, tubos y piezas moldeadas. Las materias primas espumables o bien productos espumados son de importancia en ambos campos.

Las materias orgánicas sintéticas, muy resistentes a la corrosión oxidación, pueden elaborarse, por las más variadas formas de moldeo, con facilidad para obtener artículos plásticos muy diversos, incluso reforzados, con elasticidad de goma o espumados. El hecho de que la mayor parte de ellos sean incoloros, pero fácilmente pigmentables, y algunos de los importantes transparentes, ofrece nuevas posibilidades de configuración.

# Mecanismos de falla.

## Definición.

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (CFRP por sus siglas en inglés) utilizados en forma de laminados (apilamientos de láminas cada una de las cuales contiene fibras de refuerzo en una o distintas direcciones) presentan una relación rigidez/peso que los hacen competitivos con los materiales tradicionales para aplicaciones en varios sectores industriales.

Sin embargo, del mismo modo que los materiales tradicionales, los compuestos sufren una degradación de sus propiedades mecánicas que puede conducir a la falla del elemento estructural cuando son sometidos a cargas cíclicas. El comportamiento a fatiga de los compuestos presenta diferencias substanciales respecto al de los metales, en particular, el daño en los compuestos es un daño distribuido, de naturaleza diversa (distintos mecanismos a nivel microscópico), altamente anisótropo (sustancias cuyas propiedades cambian según la dirección considerada) y que, además, conlleva una pérdida importante tanto de rigidez como de resistencia residual durante la vida del componente.

La degradación de un material compuesto puede ser debida a la aplicación de una carga estática a un elemento estructural o bien puede producirse progresivamente por daño a la fatiga, pero como los materiales compuestos presentan generalmente una resistencia a la fatiga mayor que la de los metales, el límite de un millón de ciclos es muchas veces una restricción demasiado conservadora para su estudio.

La heterogeneidad es el principal factor que marca la respuesta de los materiales compuestos sometidos a cargas cíclicas, que desde el punto de vista del comportamiento a la fatiga presenta un doble efecto contrastado, ya que por un lado es el factor que condiciona más el inicio de la degradación a nivel micromecánico debido a la existencia de distintas fases con distintas propiedades que origina que los mecanismos de degradación local inicien el proceso de degradación global. Pero por otro lado, es un factor que contribuye a que estos materiales presenten una buena resistencia a la fatiga, ya que la expansión del daño se ve detenida por la presencia de discontinuidades entre placas adyacentes o entre fases distintas debido a su diferencia de propiedades y comportamiento.

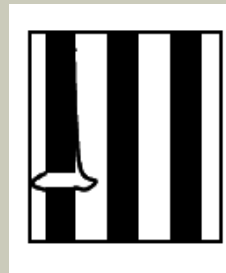


Además la anisotropía que presentan los materiales compuestos, debido a la configuración interna de un sistema de matriz polimérica reforzada con fibra unidireccional, la dirección de aparición y crecimiento de grietas no es perpendicular a la carga, como en los materiales isótropos (Hahn, 1976). Este hecho añade un grado de complejidad que hace que, para determinar la vida a fatiga de un material compuesto, se requiera un número muy elevado de ensayos, aumentando también así su costo en la investigación.

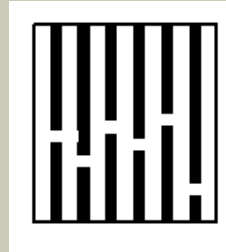
A nivel microestructural, el daño en un compuesto sólo puede obedecer a alguno de los siguientes mecanismos de falla:

**Fibras.** La ruptura de las fibras tienen un comportamiento estocástico o azaroso, como es propio de todo material de comportamiento frágil, la resistencia de las fibras cerámicas, como el vidrio o el carbono, mayoritariamente utilizadas como refuerzo de matrices poliméricas no tienen un valor bien determinado, sino que se debe distribuir como una relación de probabilidades de ruptura en función de esfuerzo, siendo la más común de estas distribuciones la de Weibull. Esta distribución de probabilidades de ruptura, junto a desalineaciones de la fibra en el compuesto y otras heterogeneidades del material debidas al proceso de producción o a su aplicación propician la producción de rupturas de fibras a valores de tensión inferiores a la resistencia nominal del material (Turón, 2003).

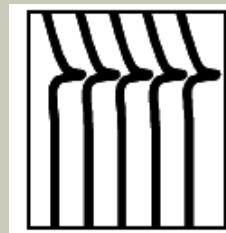
Así la ruptura de fibras tiene lugar en puntos aleatorios y, a medida que el daño progresa la densidad de las zonas debilitadas puede llegar a un nivel suficiente para que se produzca la interacción entre zonas con fibras fracturadas, produciendo la fractura fatal del material compuesto. En el caso de una carga a compresión, el micro pandeo progresivo de las fibras tiene lugar hasta que las fibras se rompen.



*Debonding (separación fibra-matriz).*



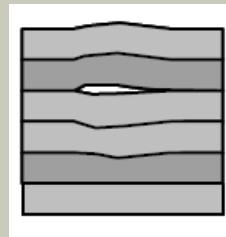
*Rotura de fibras.*



*Deformación de las láminas.*



*Agrietamiento de la matriz.*



*Delaminación.*

**Matriz.** Una grieta en la matriz puede aparecer porque la deformación del compuesto supere la deformación máxima de la matriz por el propio fenómeno de fatiga en el polímero, ya que al igual que los metales, los polímeros sufren una disminución de su resistencia residual con el número de ciclos cuando están sometidos a tensiones cíclicas.

Las grietas en la matriz tienden a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo hasta alcanzar la interfase fibra-matriz, donde debido a la mayor resistencia de la fibra la grieta puede detenerse en este punto, pero si la adherencia de la interfase es débil puede tender a propagarse paralelamente a la fibra provocando la aparición de despegue; o también puede suceder que la grieta provoque la ruptura de la fibra y continúe su propagación en la dirección transversal al esfuerzo. El agrietamiento aparece simultáneamente en varios puntos en la matriz y es habitual referirse a la densidad de las grietas para evaluar su estado de deterioro.

**Interfase fibra-matriz.** La carga aplicada puede causar una deformación tal en el compuesto que supere el límite de deformación de la fibra en alguno de sus puntos y que, por lo tanto, provoque su ruptura. Alrededor de la fractura de la fibra se producirá una redistribución de las tensiones, por lo que el esfuerzo cortante en la interfase aumenta alrededor de la fractura, y usualmente puede conducir a la desunión entre ambos componentes, llamado despegue o debonding, que equivale a una pérdida de adhesión y un deslizamiento relativo entre la fibra y la matriz. Esto produce una pérdida de adhesión y un deslizamiento con una gran pérdida de energía de fricción. Si las propiedades en la interfase entre la fibra y la matriz se pierden, la transmisión de carga desde la matriz a las fibras no se efectúa correctamente con una pérdida de características del material compuesto.

**Interfase lámina-lámina.** El modo de falla que puede aparecer es la delaminación. Esto equivale a una pérdida de adhesión entre las láminas, por lo tanto una pérdida de la correcta distribución de cargas entre ellas.

Como consecuencia de la presencia de estos modos de deterioro microestructural, a nivel macroscópico existe una degradación de las propiedades elásticas y la resistencia residual. En un laminado cada una de las láminas se van deteriorando con el tiempo según sea la orientación y contenido de su refuerzo (comportamiento anisótropo).

El deterioro microestructural que padecen los compuestos es muy distinto al de los metales. Si bien en los segundos existe un punto dañado, la nucleación de una grieta, a partir del cual ésta progresa hasta dar lugar a la fractura del material por propagación rápida; en los materiales compuestos el deterioro microestructural se distribuye en todo el material como resultado de los mecanismos de daño. Por otra parte, en los materiales compuestos se observa una pérdida de rigidez y resistencia residual desde los primeros ciclos, mientras que en los metales es casi inapreciable.

### Fatiga.

La fatiga es la condición por la cual un material se agrieta o falla como resultado de esfuerzos repetidos cuyo valor nominal es inferior al de la resistencia estática del material. Como esfuerzos cíclicos se incluyen tanto los que producen cargas externas repetidas, como los esfuerzos térmicos que resultan del calentamiento y enfriamiento alternados. Se define la vida de fatiga de un material como el número total de ciclos de esfuerzo necesarios para causar el falla total, entendiéndose como tal aquel en el que la aplicación deja de desempeñar la función para la que fue diseñada (Miner, 1945).

La gravedad de las consecuencias que acarrea el falla de un material hace que la vida a fatiga se estudie con frecuencia en el laboratorio, para posteriormente poder aplicar la información obtenida en ensayos controlados a diseños y componentes en servicio. El método más comúnmente empleado para estudiar la vida a fatiga consiste en someter al material a cargas cíclicas de amplitud constante y registrar el número de ciclos hasta la ruptura (pérdida total de la capacidad de carga) de la correspondiente prueba de ensayo.

Los datos resultantes de los ensayos de fatiga generalmente se presentan en forma de las llamadas curvas S-N, en donde los esfuerzos alternantes S (máxima tensión nominal aplicada) se representan frente al número de ciclos hasta la ruptura NR. El estudio de estas curvas revela que, a medida que disminuye el nivel de las tensiones aplicadas, aumenta la cantidad de ciclos hasta la ruptura. En aleaciones ferrosas y en algunas aleaciones de titanio se observa la existencia de un límite de esfuerzos por debajo del cual no se produce la ruptura por fatiga. A este límite se le conoce como límite de fatiga. Por desgracia, la mayoría de materiales no presentan dicho límite, por lo que con frecuencia se define el límite de resistencia de un material a la fatiga como el máximo esfuerzo aplicado que no producirá la ruptura del material antes de transcurridos un millón de ciclos de carga.

### Curvas tensión-vida remanente (S-N).

El punto de partida para cualquier modelo empírico de fatiga es conocer sus curvas S-N o curvas Whöler, que relacionan la tensión máxima de una carga de amplitud constante ( $S_{max}$ ) con el número de ciclos necesarios para llegar al umbral de su comportamiento elástico ( $N_F$ ). Sin embargo no proporcionan información sobre la disminución de la rigidez, el mecanismo de daño, la presencia de grietas o el cambio de las características de los materiales como consecuencia del proceso de degradación.

En muchos materiales, las curvas S-N muestran el concepto de resistencia límite de fatiga, las cargas cíclicas inferiores a este límite no provocan reducciones de la resistencia del material. Sin embargo, para poder obtener las curvas S-N para diferentes índices de reversibilidad ( $R =$  cociente entre el mínimo y el máximo de la tensión cíclica) deberíamos realizar un gran número de experimentos que nos permitieran generar una dependencia experimental adecuada; para evitar estos experimentos se hacen hipótesis sobre su distribución utilizando la ley de Goodman.

Con los distintos valores de  $R$  se puede identificar la naturaleza de la tensión variable:

- Valores de  $R$  comprendidos entre  $-\infty$  y  $0$  indican una tensión tracción-compresión.
- Un valor de  $-1$  indica una carga simétricamente oscilante.
- Cuando  $R$  está entre  $0$  y  $+1$  indica tensión sólo a tracción.
- Los valores comprendidos entre  $+\infty$  y  $+1$  definen tensión sólo a compresión.
- El valor límite de  $R = +1$  indica tracción o compresión estacionaria.

La curva S-N muestra las tres zonas principales que se presentan en los materiales metálicos. Una zona inicial donde la pendiente es relativamente suave, una zona central donde se incrementa la pendiente y una zona final donde la pendiente vuelve a suavizarse hasta estabilizarse en una tensión límite. También la curva muestra la disminución de la resistencia  $S$ , desde su valor estático  $S_u$ , hasta el límite de fatiga  $S_f$ .

A la degradación microestructural se le asocia una variable de daño que se suele identificar con una propiedad del compuesto, siendo la resistencia residual y la rigidez residual las más frecuentes. A partir de las curvas S-N es posible obtener la disminución de resistencia que provoca una carga cíclica cualquiera en el material y así conocer la evolución de la resistencia residual ( $S_R$ ). Normalizando la función de resistencia residual se obtiene la evolución del factor de reducción ( $f_{red}$ ) del umbral de discontinuidad del material.

Las curvas S-N y la evolución de la variable resistencia residual son dependientes del tipo de tensión cíclica. Cada punto de un elemento estructural sometido a cargas cíclicas está sometido también a esfuerzos fluctuantes. Su forma en el tiempo viene dada por una función sinusoidal.

El comportamiento de los materiales compuestos a fatiga influye en la evolución de las curvas S-N, como también a la ley modificada de Goodman.

El tratamiento de la fatiga en compuestos es relativamente sencillo cuando el estado tensional implica que la tensión más importante coincide mayoritariamente con la dirección de la fibra. Si embargo, la problemática se acentúa al estudiar la degradación de un material compuesto sometido a un estado complejo de tensiones. En cada una de las direcciones en el plano de la lámina el material compuesto presenta no sólo una resistencia distinta sino también una ley de degradación particular.

En este caso la estimación de la vida útil requiere postular hipótesis de comportamiento, por lo que se suponemos un material compuesto en forma de laminado, junto con un estado biaxial de cargas para cada una de las láminas, así deberemos conocer la magnitud de las tensiones cíclicas en la dirección de los refuerzos de cada lámina así como la perpendicular a ésta; de esta manera podemos dividir la problemática del tratamiento de la anisotropía de un compuesto en dos.

Partiendo de las tensiones cíclicas, las curvas S-N y la regla lineal de disminución de la resistencia residual del material compuesto (que es la regla de Palmgren-Miner) para cada una de las dos orientaciones conoceremos la degradación microestructural en la dirección de las fibras y en la perpendicular a ella. En otras palabras, estimaremos el daño acumulado en los refuerzos y en la matriz del material compuesto por separado.

#### **Criterios de falla polinomiales.**

Estos criterios de falla no distinguen el tipo de falla ni cual es la fase dominante en la fractura. En consecuencia no pueden tener en cuenta fenómenos que pueden pasar en la interfase entre la matriz y la fibra. En esta categoría de criterios se pueden clasificar las distintas propuestas distinguiendo sí el criterio de falla permite o no predecir el falla de la lámina pero no el modo de falla o la fase que rompe.

Para todos estos criterios de falla es necesario determinar parámetros mediante la experimentación en el laboratorio. Normalmente son necesarias pruebas de tracción y compresión uniaxial, en dos direcciones perpendiculares y pruebas de corte. Algunos de estos criterios también necesitan de pruebas de tensión biaxial. En muchos de estos casos estos parámetros son términos que permiten formular una expresión cuadrática polinomial que define los estados de tensiones o deformaciones máximos que permite el material.

Los criterios de falla agrupados en este tipo de aproximación utilizan algunas expresiones matemáticas para describir la superficie de fluencia para un material de comportamiento anisótropo. Generalmente, estas expresiones están basadas en ajustes de curvas obtenidas experimentalmente.

### Criterios asociados a los modos de falla

Los criterios polinomiales si bien son capaces de predecir como será el falla del laminado, el inconveniente que tienen es que no identifican el modo de falla o el componente que falla.

Muchas de las formulaciones de los criterios de falla, que sí tienen en cuenta la falta de isotropía, no tienen en cuenta el carácter heterogéneo de los materiales compuestos y su influencia en el falla. Este es el caso de los criterios polinomiales.

Para solucionar esto se han desarrollado diversos criterios asociados a los distintos modos de falla, tomando en cuenta el tipo de falla. En ellos se trata separadamente la falla de la fibra y de la matriz y se tiene en cuenta como sucede.

Los criterios de este tipo más sencillos son el de máxima tensión y el de máxima deformación. Estos criterios presentan la limitación de que no permiten una relación entre la tensión normal y cortante. No suele dar resultados precisos si se aplica a estados de carga distintos al uniaxial.

### Modelos de predicción de fatiga y vida remanente.

El objetivo a largo plazo de los estudios sobre el daño en los materiales compuestos consiste en desarrollar un marco conceptual que permita predecir de forma adecuada el deterioro microestructural según un estudio de cargas, su evolución, interacción e influencia sobre las propiedades macroestructurales del material. Con lo cual no sólo se podrá prever la esperanza de vida de un elemento estructural, sino que también será posible hacer el diseño del material compuesto para una vida de uso óptima en una aplicación determinada.

Habitualmente para estimar la vida útil de un componente estructural es suficiente con la predicción de la disminución de resistencia o de su rigidez (Reifsnider, 1991), por lo tanto, la vida estructural puede definirse en términos de una pérdida de estas dos características a lo largo del tiempo, así cuando a lo largo del servicio del componente cualquiera de ellas disminuye, colocándose por debajo de los valores admisibles se habrá llegado al final de su vida útil.

En general se podría decir que todo método de predicción de vida para un material engloba:

- Una observación experimental del proceso de acumulación de la degradación y la definición de una métrica de daño.
- La formulación de un modelo de acumulación de daño en términos de la métrica de daño y la caracterización experimental de los parámetros del modelo utilizando experimentos simples.
- El desarrollo de un procedimiento de adición de degradación basado en la métrica de daño para predecir la vida bajo cargas de fatiga generales.
- La verificación experimental de las predicciones de vida.

Por ejemplo, el tamaño de la grieta que produce la fatiga es una métrica de daño para los metales; así que utilizando una teoría adecuada de crecimiento de grieta y sus parámetros mediante experimentos puede elaborarse un modelo de degradación. En contraste, para un material compuesto no es posible obtener el mismo tipo de métrica ya que el proceso de acumulación de daño es mucho más complejo, debido a sus mecanismos de falla, y como consecuencia han aparecido numerosos métodos de predicción de vida con enfoques muy diversos.

Actualmente el uso de modelos matemáticos y métodos numéricos se utilizan para predecir y simular el comportamiento de los materiales compuestos, debido a la falta de una experimentación empírica, siendo una buena herramienta de ayuda para el análisis y el proceso de diseño de estos materiales.

Uno de los primeros pasos es conocer el comportamiento del propio CFRP, debido a que se trata de un material altamente heterogéneo; pero una de las dificultades en su análisis es la determinación de las propiedades globales o efectivas (módulo elástico o de rigidez, estado límite de resistencia, etc.) a partir de las propiedades de los elementos que lo constituyen, complicándose aun más en los compuestos laminados con largas fibras orientadas a causa principalmente por la elevada anisotropía de cada lamina, del laminado resultante y a la existencia de efectos de acoplamiento en las deformaciones (como el acoplamiento tracción-cortante).

#### **Modelo de fatiga micromecánico.**

Existen las aplicaciones a través de micromodelos o modelos micromecánicos donde se consideran los mecanismos microestructurales que se establecen entre los diferentes elementos que constituyen al material compuesto; para ello es necesario conocer su disposición y distribución exacta y la interacción que existe entre ellos. Dado que el estudio de un sólido a esta escala requiere tener en cuenta la disposición de cada una de las fibras y de cada espacio que ocupa la matriz este enfoque resulta impracticable para los polímeros compuestos laminados y la complejidad y el tamaño del modelo necesario haría que el costo computacional fuese demasiado alto, por lo que estos modelos solamente se han utilizado para estudiar fenómenos locales de interacción entre los materiales constituyentes.

Un modelo micromecánico, para poder representar fielmente los distintos mecanismos de daño dominantes, necesitaría todo un conjunto de variables o métricas de daño que estuvieran relacionadas, cada una de ellas, con un modo de degradación, con su propio ritmo de crecimiento y con un nivel umbral de activación adecuado según su estado de carga; por lo tanto este tipo de modelo debería basarse en la estadística de resistencia de las fibras y en la mecánica de fractura en materiales heterogéneos.

En un material que se degrada a la fatiga debe estar activo algún mecanismo de daño que progrese con el número de ciclos, dando lugar a una acumulación irreversible de daño. En los materiales compuestos el crecimiento de grietas en la matriz o en la interface fibra/matriz debería seguir una ley de crecimiento de tipo potencial, la integración de una ecuación de este tipo con el número de ciclos desde un tamaño de defecto inicial hasta la grieta actual permite obtener una expresión del daño en función del número de ciclos.

#### **Modelo de fatiga macromecánico.**



Por otro lado, la aproximación macromecánica necesita de un proceso de homogenización, es decir, una formulación que permita obtener las propiedades efectivas del material compuesto para poder tratar su comportamiento como si fuera homogéneo. Muchos de estos modelos están basados en la teoría de mezclas para calcular las propiedades efectivas de los materiales compuestos; siendo sus hipótesis básicas las siguientes:

- Las propiedades mecánicas del compuesto resultan de la participación de cada uno de los componentes según su porcentaje volumétrico.
- En un volumen infinitesimal participa una cantidad finita de sustancias de los componentes.
- Cada sustancia participa en la misma proporción a escala macro y microscópica.
- La deformación es la misma para cada componente.

Tradicionalmente la simulación del comportamiento elástico de laminados se ha llevado a cabo mediante lo que se conoce como la teoría de laminados, al que se le puede considerar un modelo cuasi-macromecánico donde se analiza el comportamiento del laminado suponiendo cada lamina como un sólido de características mecánicas homogéneas, generalmente anisotrópicas. Las propiedades mecánicas efectivas de las láminas se pueden obtener a partir de teorías como la regla de mezclas clásicas mediante modelos micromecánicos más evolucionados o a partir de ensayos experimentales. La teoría de laminados impone compatibilidad cinemática entre todas las laminas teniendo en cuenta su posición en el laminado y su grosor, por lo que cualquier deformación en el laminado se desglosa en una deformación plana mas una deformación de curvatura, asumiendo que el laminado es suficientemente delgado para que el radio de curvatura sea el mismo para todas las sus laminas. Esta teoría proporciona en general buenos resultados en el campo elástico y para esfuerzos de tracción, siempre y cuando el laminado sea lo suficientemente esbelto.

En el estudio de laminado se persigue obtener las propiedades a fatiga efectivas de un compuesto concreto para cualquier estado de carga a través de la interpolación, y a veces la extrapolación, de los datos experimentales en unos estados de carga sencillos, y dado que el comportamiento a fatiga se deduce de los resultados empíricos es necesario disponer de ensayos de exactamente el mismo laminado (constituyentes, secuencia de apilamiento de las laminas, orientación de las mismas, fracción de esfuerzo en cada lamina, etc.) del que se quiera conocer el comportamiento en condiciones generales. Por lo tanto este tipo de estudio es difícilmente generalizable debido a que para compuesto particular es necesario disponer de ensayos.

Pero al analizar las laminas como un material homogéneo se pierde toda referencia de los constituyentes y sólo es posible reconocer los fenómenos de degradación a partir de un enfoque fenomenológico, ya que se manejan las características efectivas del material compuesto. Aunque los modelos anteriores son útiles para el diseño, es difícil abordar estudios del comportamiento más allá del límite elástico o para tiempos largos (fatiga, termofluencia, degradación ambiental y/o química, etc.). Las propiedades específicas del compuesto se van modificando por el daño progresivo que van adquiriendo sus elementos constituyentes durante su servicio por la aparición de distintos sucesos, ya sea en forma de desunión matriz-fibra, ruptura de las fibras de refuerzo u otros mecanismos de falla como la el agrietamiento de la matriz; para ello se hace necesaria la creación de aproximaciones que, sin llegar al detalle de los modelos microestructurales, no pierdan las características de una de sus sustancias componentes.

Un posible enfoque que permite este tipo de análisis es aplicar una generalización de la teoría de mezclas que permita determinar el comportamiento no lineal del material compuesto combinando en cada momento y en cada punto del material el comportamiento de sus elementos constituyentes, cada uno con su propio modelo constitutivo (Car, 1999 y 2000). Denominando a este tipo de aproximaciones mesomodelos.

Otra alternativa es el uso de teorías de doble escala o de homogenización en las que se plantea dividir el problema del comportamiento de los materiales heterogéneos a dos niveles; para ello se utiliza una escala global representada por el dominio  $X$  y una escala local representada por  $Y$  donde se analiza la estructura interna del compuesto a través de un volumen representativo del medio heterogéneo, para que la escala local permita tratar la escala global como si fuera un material homogéneo.

Con este tipo de método sólo es posible modelar materiales con un dominio estadísticamente homogéneo que permita determinar un volumen elemental representativo, es decir, el método es aplicable a materiales donde exista una distribución de refuerzos homogénea o periódica.

### Modelos de daño continuo.

Mediante estas formulaciones es posible modelar el proceso de daño o degradación de un material en un medio continuo, que considera que el daño responde a procesos irreversibles que suelen estar asociados a la aparición de microgrietas a lo largo del volumen del material. Los primeros estudios sobre mecánica de

daño corresponden a Kachanov (1958) quien aplicó una variable continua de daño para elaborar un modelo de falla por termofluencia en los metales. Estas teorías fueron extendidas a finales de los 70's, permitiendo unificar el daño o degradación causado por diversos fenómenos, como ciclos térmicos, pandeo y fatiga por cargas cíclicas.

Un modelo formulado dentro de la mecánica de medios continuos permite solucionar una serie de carencias que tienen los basados en mecánica de la fractura, como la combinación de comportamientos de fatiga, fractura, daño, plasticidad, entre otros. La mecánica de medios continuos también permite tener en cuenta los efectos combinados de otros factores como la temperatura y los estados de tensiones multiaxiales complejos, también permite englobar fenómenos de acumulación no lineal de daño, que aparecen cuando la pieza está sometida a distintos niveles de amplitud de carga, por lo tanto este enfoque permite integrar al modelo constitutivo de un compuesto la degradación por la acción de las cargas fluctuantes.

#### **Análisis de los materiales compuestos por el método de los elementos finitos.**

Los métodos que proporcionan una solución analítica al análisis de elementos estructurales de materiales compuestos sólo son aplicables a casos de una complejidad geométrica baja con un comportamiento elástico lineal; por lo tanto se hace necesario disponer de herramientas de simulación numérica que permitan abordar la resolución de cualquier modelo matemático que describa el comportamiento de un material compuesto, siendo actualmente el más empleado el análisis de elementos finitos (FEM), pudiendo clasificarse de la siguiente manera:

- Teoría de elementos sólidos planos o espaciales. Con esta teoría el laminado se moldea a través de un elemento continuo bi o tridimensional, se pueden utilizar un gran número de elementos (como mínimo uno por capa) para modelar al laminado, o bien utilizar elementos con sub-laminados donde se aplica una teoría de capa única. Aunque esta teoría no es aplicable en la mayoría de los elementos estructurales de CFRP, dado que su grosor suele ser mucho menor que sus otras dimensiones se obtienen mallas de elementos sólidos con geometrías muy distorsionadas, lo que conlleva grandes errores numéricos.
- Teoría de capa única equivalente. En esta teoría el laminado se representa por un elemento de capa única equivalente con las propiedades anisótropas específicas; basada en forzar un campo de desplazamiento continuo a través del grosor del laminado. Esta teoría requiere un bajo costo

computacional, aunque no permite obtener cierto tipo de resultados, como por ejemplo, las tensiones cortantes entre láminas.

## Método de Elementos finitos.

Los métodos de elementos finitos constituyen hoy en día el procedimiento habitual de cálculo en Mecánica Estructural y Mecánica de Sólidos en general que tengan un mínimo de complejidad, y se extenderá rápidamente en un futuro próximo. Su uso está muy extendido también en la resolución de problemas de Transferencia de Calor y la Mecánica de Fluidos o el Electromagnetismo.

En el caso de la Mecánica Estructural, conocemos el cálculo de estructuras de barras (1D) y soluciones limitadas de placas (2D). Si bien la mayoría de las estructuras son continuas (3D). De hecho, los Métodos Matriciales se pueden inferir como un caso particular del Método de los Elementos Finitos.

El Método de los Elementos Finitos es hoy en día el método más potente y flexible de cálculo de estructuras 1D, 2D y 3D. La metodología de elementos finitos, tal y como se entiende actualmente es relativamente moderna y su desarrollo se ha debido a la disponibilidad de herramientas de cálculo cada vez más potentes; siendo su origen en la década de los cincuenta, cuando aparecen las primeras herramientas de cálculo digital que permiten resolver de forma automática estructuras de barras sin recurrir a tediosos procedimientos, como el de Cross o el de Kani. Es entonces cuando aparece el cálculo matricial de estructuras. El Método de los Elementos Finitos surge como una generalización del cálculo matricial en 1956 dentro de la tecnología aeronáutica. Así, aunque el método nació en el ámbito del cálculo de estructuras, durante los años sesenta se descubrió que sirve para múltiples áreas.

Desde el punto de vista matemático consiste en resolver numéricamente problemas planteados mediante ecuaciones diferenciales. Para ello se comienza idealizando un modelo matemático (teoría de láminas planas, láminas curvas, elasticidad tridimensional, etc.), que implica una serie de simplificaciones bajo una serie de hipótesis: definición de las propiedades mecánicas de los materiales y carácter de deformación de los materiales (pequeños desplazamientos, grandes desplazamientos, análisis estático, análisis dinámico, etc.).

Las estructuras son tridimensionales pero en algunos casos su comportamiento puede describirse mediante modelos unidimensionales o bidimensionales. Por ejemplo, para una presa pueden utilizarse como hipótesis simplificadora el modelo de comportamiento de la flexión de placas analizando únicamente la deformación del plano medio de la misma.

En la actualidad la aplicación más importante del Método de los Elementos Finitos es el cálculo de tensiones en sólidos y estructuras. Dentro del cálculo de tensiones se distinguen dos tipos generales de aplicaciones: el cálculo lineal y el no lineal. El cálculo lineal puede ser tanto estático como dinámico y se utiliza principalmente durante el proceso de diseño, para optimizar el uso del material y adecuar al cumplimiento de la normativa.

Así mismo, el Método de los Elementos Finitos se emplea en problemas de transferencia de calor. Se distinguen igualmente entre cálculos lineales y no lineales ya que, en general, aplican las mismas ecuaciones que en el caso del cálculo de tensiones. En la Mecánica de Fluidos los elementos finitos han sido menos empleados en disminución del Método de Diferencias Finitas porque la representación de la geometría no tiene tanta importancia y porque en muchas de las aplicaciones los problemas tienen carácter no lineal. Aplicaciones que requieren sólo cálculos lineales, como son el estudio del flujo en medios porosos, la difusión de contaminantes o la propagación del oleaje, el Método de Elementos Finitos está muy extendido, además el uso del Método de los Elementos Finitos en problemas de Electromagnetismo es muy reciente.

# Materiales compuestos en la construcción.

## Sistemas constructivos.

En el sector de la construcción la expansión de los materiales compuestos no ha sido tan generalizada comparada con otros sectores productivos. Debido a que se trata de un sector atado por la tradición y que se ve reflejado numerosas veces cuando se han tratado de introducir cambios ya sea en la utilización de nuevos sistemas constructivos y/o materiales de uso.

A mediados de los 80's en el EMPA (Laboratorio Suizo de Materiales) en Zúrich (Suiza) se empezaron a hacer pruebas para la utilización de los materiales compuestos como refuerzo exterior de elementos de concreto armado, hasta que en 1991 se ejecutó la primera obra real, reforzando el puente Ibach en Lucerna, y en 1995 se empezó a utilizar este tipo de sistemas de una manera sistemática, iniciando así también su comercialización.

Aunque, con el tiempo los materiales compuestos están siendo introducidos, y actualmente han experimentado un crecimiento importante a nivel mundial, que se ve reflejado en diversas aplicaciones que se encuentran hoy en día en servicio.

A nivel internacional es en Estados Unidos donde más se ha investigado y más avanzadas se encuentran las aplicaciones en la construcción de CFRP. El *Infrastructure Composites Report 2001* (Julio 2001) pronosticó un crecimiento de un amplio en el uso de materiales compuestos en construcción en todo el planeta desde el año 2001 hasta el 2010. Así mismo, previó que este crecimiento sería del 750% en Estados Unidos en los próximos 10 años.

A nivel estructural (elemento resistente), la aplicación de materiales compuestos ha abierto un mercado importante en la construcción de puentes, y es precisamente es este campo en Estados Unidos donde se encuentran los mayores avances en la investigación del uso de materiales compuestos en la construcción. Así, generalmente los utilizados para rehabilitar estructuras de ingeniería civil tiene los siguientes propósitos:

- Incrementar la fuerza a la flexión y la rigidez.
- Incrementar la capacidad de carga axial.
- Incrementar la fuerza a la torsión y/o a la deformación, e
- Incrementar la ductibilidad y la capacidad de desplazamiento.

Un tablero o cubierta se define como un elemento estructural que transfiere cargas transversalmente a los soportes. Los tableros comercialmente disponibles a la fecha pueden ser clasificados en dos: los de tipo sándwich y las placas poltruidas unidas; en ambos casos el control de calidad del producto es posible por los procesos de fabricación estandarizados.

Las estructuras de sándwich han sido ampliamente utilizadas para la aplicación en la industria aeroespacial, marina y automotriz especializada, donde los requerimientos de rigidez y fuerza se deben lograr con un mínimo de peso (Vinson 1999). La construcción de estos sándwich implica el uso de placas rígidas de baja densidad en las caras que soporten la fuerza a flexión unidas al material del núcleo que separa las caras y asegura la acción de los tableros. Debido a que se puede intercambiar las caras y el núcleo en el proceso de manufactura, las estructuras de sándwich presentan una gran flexibilidad en el diseño.

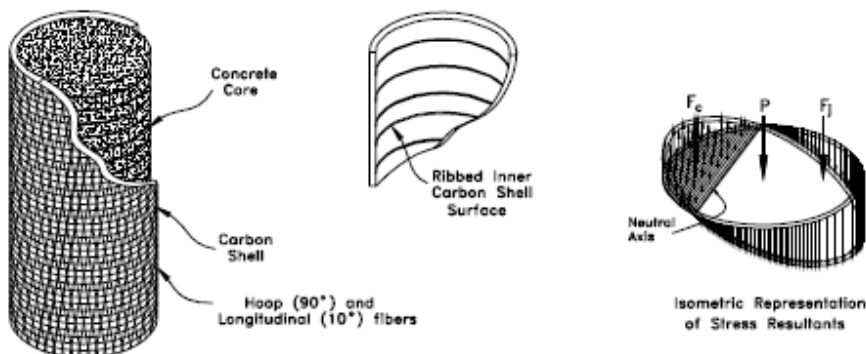
En la actualidad, existen diversos sistemas de construcción (o combinación de ellos) para elementos estructurales de puentes con materiales compuestos. Siendo los más destacados los listados a continuación:

- Tableros Duraspan. Son los tableros más usados para la ingeniería civil en EEUU. Los tableros pueden ser de 6 a 8 m de longitud y un ancho de 3,5 m. Está formado por dos pieles paralelas (una superior donde se sitúa la capa asfáltica y otra inferior) unidas mediante perfiles de fibra de vidrio (sin núcleo). Se realiza por poltrusión con refuerzos a lo largo del tablero para soportar los esfuerzos a cortante. Un ejemplo de aplicación es el puente sobre Lewis & Clark en Astoria (Oregón, EEUU).
- Tableros Hardcore. Esta tecnología está basada en el sándwich con núcleo en panal de abeja y el proceso de RTM asistido por vacío (VARTM). Un ejemplo de aplicación es el puente "Five mile road", en el condado de Hamilton, Ohio, EEUU. Este puente posee 13,4 m de longitud por 8,5 de anchura.
- Tableros Superdeck. Tableros constituidos por perfiles de poltrusión formando geometrías de hexágonos y dobles trapecios. Todo ello lleva unas pieles de fibra de vidrio que forman un



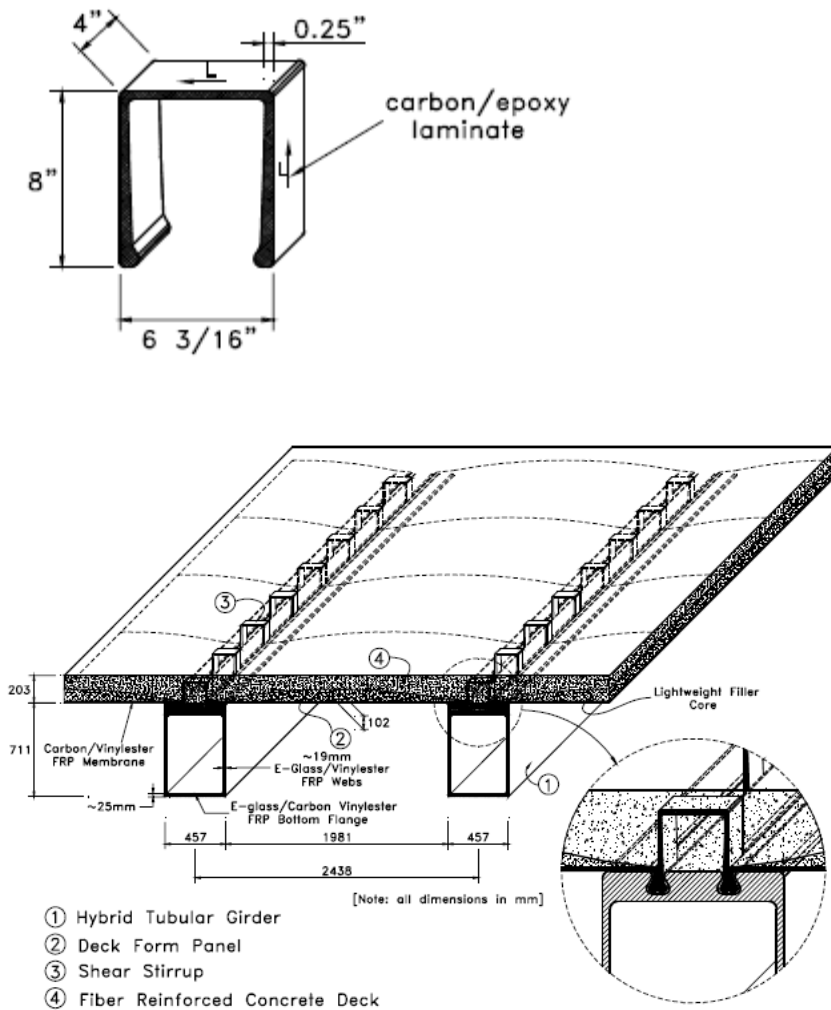
conjunto prefabricado para transportar a la obra para su montaje. Estos tableros se apoyan sobre largueros metálicos. Un ejemplo de aplicación es el puente Wickwire Run, Taylor County, West Virginia, EEUU. Este puente fue abierto al tráfico en 1997 con una longitud de 9,14 m y una anchura de 6,6 m.

- Tableros Viga Cajón. Tal y como su nombre indica se trata de tableros formados por varias vigas en forma de cajón de vidrio/poliéster con una placa superior de dos capas: una primera constituida de vidrio/poliéster y una segunda de viniléster y un conglomerado de rodadura. Un ejemplo de aplicación es el puente Troutville Weigh Station (Interestatal 81 en Troutville, EEUU). Sus tableros miden 4,5 m de longitud por 1,5 m de anchura y es transitado por 13.000 vehículos de más de 20 t cada día.
- Tableros Tech-Deck. Formado por perfiles rectangulares pultruidos rellenos de concreto y unidos para formar un panel. Esta solución asegura que no habrá problemas de estabilidad local, aunque a cambio se incrementa de forma muy notoria el peso del conjunto.
- El concepto CSS (Composite Shell System). Se trata de un tubo de carbón/epoxi que se rellena de concreto. El tubo se fabrica por enrollamiento filamentario, poltrusión o RTM. Estos tubos desempeñan la función de vigas apoyándose encima de ellas los tableros de los puentes.



- Sistema de Tubo Híbrido (HTS). Consiste en una viga tubular rectangular de FRP realizado por poltrusión, conectado a todo largo en la parte superior con placas arqueadas de concreto reforzado con fibras de polipropileno, que trabajan predominantemente a la compresión. Se utiliza concreto de peso normal para la placa y las fibras de refuerzo controlan el agrietamiento debido a las contracciones y a los efectos de la temperatura. Este sistema está basado en un concepto desarrollado por el Ministerio de Transporte en Ontario, Canadá.





- Vigas Multicelulares. Son vigas multicelulares híbridas. Tienen forma rectangular y son de fibras de vidrio y de carbón con dos rigidizadores para evitar el pandeo de las almas. Fabricadas mediante poltrusión. Un ejemplo de aplicación es el puente Sugar Grove (Virginia, EEUU) de 12 m de longitud.
- Concepto Maunsell. Son perfiles rectangulares de poltrusión con encajes para unir mediante otros perfiles de poltrusión. Este concepto ha quedado desfasado por problemas con la rigidez. Está realizado con fibra de vidrio y lo convierte en un puente demasiado flexible. Un ejemplo es el puente del río Tay en Escocia.

Además de la aplicación en puentes, los materiales compuestos también se utilizan para otras finalidades en las estructuras de construcción en general (Universidad de Zaragoza, 2002):

- Sustitución del armado corroído y el concreto que le rodea. Las reparaciones consisten en sustituir las armaduras corroídas junto con el concreto circundante por una nueva capa de concreto a la que se le une una lámina de material compuesto, generalmente de matriz termofija.
- Refuerzos a una estructura existente. Con objeto de mejorar la capacidad a flexión, a cortante o la ductibilidad del elemento reforzado. Junto con el pretensado exterior de una estructura, utilizándose cables, barras o elementos especialmente diseñados para el pretensado con sistemas habituales.
- Cables "activos". La última generación de ascensores de Schindler, el modelo Eurololift, presenta cables de aramida, con la mitad de peso, el doble de resistencia y capacidad de monitorización de deformaciones.
- Sistemas de unión "activos". Materiales con memoria de forma. Enfriando cambian la forma y al volver a temperatura ambiente recuperan la forma inicial. Por ejemplo remaches.
- Cimentaciones "activas". Formadas por materiales compuestos electroreológicos, materiales normalmente líquidos pero que con el paso de la corriente eléctrica se vuelven sólidos. En caso de sismo deja de pasar corriente a través del material con lo que algunas cimentaciones se vuelven líquidas y consiguen un conjunto más flexible.
- Reparaciones de elementos dañados por la corrosión en ambientes marinos que requieren que se remueva todo el concreto contaminado con cloruro, y usualmente esto no es posible en una columna reparada. Como resultado, las reparaciones convencionales necesitan ser repetidas varias veces en la vida útil de la estructura. El recubrimiento con CFRP puede ser viable al ser capaz de restaurar la capacidad perdida y resistir las fuerzas transversales producida por la expansión debida a la corrosión.
- Refuerzos de materiales compuestos para productos de concreto (espiga de metal, barras de refuerzos, tendones de postensado y pretensado, estructuras fijas). Así las antiguas estructuras y los nuevos materiales adheridos crean un nuevo elemento estructural que tiene una fuerza y rigidez mas altas que el original.

La principal diferencia entre los refuerzos pretensados y no pretensados es el nivel de estrés y, correspondientemente, el tipo de materiales constitutivos elegidos. Los FRP con fibra de vidrio de bajo costo se utilizan generalmente para aplicaciones no pretensadas porque su capacidad son sustancialmente mas bajas que el carbono o la aramida. Los refuerzos unidimensionales son hechos típicamente por poltrusión y para mejorar la unión con el concreto se aplican deformaciones a la superficie (tipo estriado).

Un tipo de refuerzo habitual es el de flexión, colocando bandas preimpregnadas o rígidas en las zonas de tracción. En Europa un amplio número de puentes deteriorados se han reforzado utilizando materiales compuestos en lugar de las convencionales laminas de acero debido a que estas presentan claras desventajas, como su limitada longitud (de de 6 a 8 metros max.), transportación, manejo y peso (Recuero, 1997).

Otro tipo es el refuerzo de pila y columnas, envolviéndolas con placas de fibras preimpregnadas. En 1981 se modificó la normatividad de los Estado Unidos respecto al proyecto antisísmico de puentes, multiplicando por 8 el rango de seguridad para el refuerzo transversal necesario en las pilas; por lo que se han utilizado este tipo de refuerzos en puentes de California con objeto de mejorar la ductibilidad de las pilas ante la acción sísmica.

Las ventajas del confinamiento en concreto reforzado deficiente en regiones de actividad sísmica ha probado ser una de las más significativas de las aplicaciones recientes de los FRP. El confinamiento adecuado, ya sea con cubiertas prefabricadas o placas curadas que se aplican in situ, en las que la dirección principal de las fibras en circunferencial, incrementan la capacidad de rotación (y por lo tanto la ductibilidad) en las zonas de articulación, además de que previene el despegue de los refuerzos internos, además de que contiene la expansión lateral del concreto.

## Concreto reforzado con FRP.

Durante la década anterior el concreto reforzado con compuestos de matriz polimérica (FRP) ha crecido, dejado de ser un mercado emergente; especialmente con el incremento constante del precio del acero. De manera general se podría creer que sólo se desarrollarán aplicaciones de poco uso con un potencial en el alto volumen de fabricación. Sin embargo, debido a que el uso como refuerzo estructural es muy riguroso ,los materiales compuestos se han convertido en uno de los productos mas investigados y probados en la

industria de la construcción; requiriendo pruebas sustanciales, aprobaciones normativas, certeza en la calidad y confiabilidad, esencialmente dirigidas a un nicho dentro de la construcción.

Como resultado estos productos se han resistido al escrutinio de los ingenieros y arquitectos, sobrepasando barreras para su aceptación a la vez que se transforma la manera en que el concreto reforzado y precolado es utilizado en las estructuras de edificaciones e ingeniería civil.

Las barras de FRP han sido utilizadas de refuerzo en el concreto desde la década pasada, resultando muchos proyectos de la Administración Federal de Carreteras Estadounidense que provee fondos a través del programa de Investigación y Construcción en la Innovación de Puentes. Las barras de refuerzo en las cubiertas de los puentes son los principales elementos de carga, situados en un ambiente hostil siendo sujetos a años de repetidas cargas con grandes riesgos asociados a la naturaleza de los puentes. Esto explica el porqué la industria de los puentes es tan conservadora.

### **Desempeño y durabilidad.**

Uno de los principales mecanismos de falla en las cubiertas de los puentes de concreto reforzado es la corrosión del acero en las varillas de refuerzo. Cuando el acero se corroe se expande y pierde la unión con el concreto, causando escamas en el concreto adyacente, resultando en el falla de la cubierta de concreto y limitando el uso de vida de la estructura. Usualmente la resolución de este problema consiste en encontrar una manera de proteger al acero a base de aditivos para el concreto, incrementando el espesor de cubierta del concreto sobre las varillas, aplicando una cubierta en las varillas, el uso de acero no ferroso y/o concreto de alto desempeño.

Un ambiente rico en cloruros, como la cubierta de un puente, está sujeto a sales debidas al deshielo o a la salinidad natural del agua, acelerando el proceso de oxidación del acero, haciendo inevitable la fractura del concreto, permitiendo a los cloruros penetrar hacia el acero; además de que se puede producir una electrolisis química afectando aun mas el acero de refuerzo. Los refuerzos de FRP no son afectados por el ataque de los cloruros y no se corroen, eliminando así el mecanismo de falla típico extendiendo la vida útil del puente.

### Técnicas de construcción.

Generalmente, la instalación y construcción de la cubierta de un puente utilizando barras de FRP y varillas de acero tienen muy pocas diferencias. Debido al bajo módulo de elasticidad del material compuesto las barras necesitan ser soportadas a una menor distancia, aproximadamente dos tercios, que las varillas de acero; además se recomienda que el 50% de las intersecciones entre las barras sean unidas usando estribos cubiertos de plástico. El FRP es menos denso que el concreto, por lo que se recomienda que las barras sean atadas internamente; además de que se debe tener especial cuidado al momento del colado del concreto.

Los refuerzos con barras de FRP se han utilizado en cubiertas, protecciones, contrafuertes y columnas en muchos proyectos exitosos de puentes. El Floodway Bridge localizado en la Autopista Canadiense en Winnipeg, consiste de dos puentes de ocho claros cada de 29 metros, siendo un largo total de 230 metros. Utilizando un concepto de cubierta libre de acero reforzada con barras de FRP en la parte superior e inferior; requiriendo más de 150 toneladas del material (resaltando que el FRP tiene un cuarto de la densidad del acero y podría ser equivalente a aproximadamente a 500 toneladas de acero). Un análisis del costo total del ciclo de vida del puente fue hecho para escoger los refuerzos de FRP, sin existir otros factores que afectaran la decisión del uso del material, fue elegido simplemente por el análisis costo-beneficio.



Floodway Bridge.

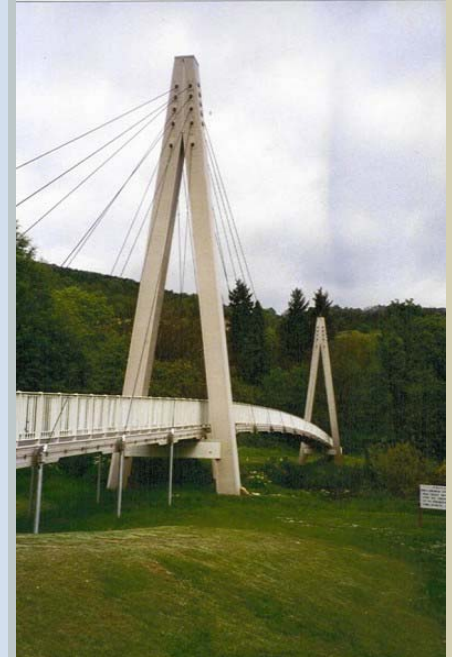
## Construcciones destacadas.

A principios de los noventa la compañía "Neste Oy Chemicals company" establecida en Helsinki (Finlandia), desarrolló y construyó una casa experimental llamada "Nesthaus", como banco de pruebas de la posible utilización de materiales poliméricos en el sector de la construcción. En 1992, un puente de materiales compuestos fue inaugurado en la localidad escocesa de Aberfeldy, el puente situado sobre el río Tay. Está considerado como una de las mejores obras de materiales compuestos, y sus dimensiones son de 2 metros de ancho por 120 metros de longitud.

En el año 2000 se construyó en la autopista interestatal 86, cerca de San Diego (California), el puente llamado "The King Stormwater Bridge". Este puente fue nombrado puente estelar de la construcción de los Estados Unidos de América. Este está realizado a base de materiales compuestos, concretamente 12 estructuras cilíndricas de carbono CSS de 355 mm de diámetro y 9.5 mm de espesor rellenos de concreto, que constituyen el sistema de refuerzo longitudinal del puente. El claro es 20 metros y un ancho de 12.8 mts. El tablero está formado por 6 paneles de tipo "Duraspan" de 12.8 m de anchura y 3.3 m de longitud. No es el puente más largo construido, pero sí el más transitado y el que más carga debe soportar.

En vistas del éxito del puente "The King Stormwater Bridge", las autoridades de California han promovido el "I-5/Gilman Project". Este consiste en un puente de materiales compuestos en la autopista interestatal 5 en San Diego, con unas dimensiones de 137 metros de longitud, 46 metros de altura y 3.7 metros de ancho. Las columnas y las vigas longitudinales están proyectados en CSS, y los travesaños en vigas de poltrusión híbridas vidrio/carbono huecas. El tablero está diseñado en vidrio/poliéster y los cables en carbono y acero. Este puente está a la espera de su aprobación de presupuesto definitiva.

El Museo de Arte de Milwaukee (2001) diseñado por Santiago Calatrava. Posee unas alas móviles de 32m de longitud para dejar pasar la luz a la galería del museo. Estas alas están formadas por 72 timones de 0.6 metros de espesor y de longitudes variables entre 32 y 8 metros. Estos timones estaban proyectados en



Puente de Aberfeldy

carbono/epoxi mediante enrollamiento por filamentos pero se fabricaron en acero por cuestiones económicas.



Museo de arte de Milwaukee.

La Glasgow Science Tower (Escocia, 1992). Es una torre de 120 metros de altura, cuya parte superior gira libremente con el viento. La parte superior está fabricada en fibra de vidrio y el mástil y sus refuerzos en fibra de carbono.

El Millennium Dome (Londres, 2000). Es la mayor cúpula del mundo con una superficie de 80 000 m<sup>2</sup> y 50 metros de altura. La membrana está realizada en tejido de fibra de vidrio y matriz de teflón.

Un ejemplo de edificio realizado íntegramente de materiales compuestos, es "The Eyecatcher building", que es el edificio de viviendas y oficinas con estructura composite más alto realizado hasta el momento. Fue construido en Swissbau, para su presentación, y posteriormente desmontado y vuelto a construir en Basel, donde actualmente se utiliza como edificio de oficinas. Sus dimensiones son 15 metros de altura (5 pisos) con una planta de 10 x 12 metros.

Es conveniente resaltar que muchas de las construcciones mencionadas corresponden a puentes, pues esta tipología de construcción es donde está más difundido el uso de materiales compuestos y es donde aparecen las obras más representativas de su aplicación en la construcción en general.



## Construcciones relevantes en España.

En cuanto a ejemplos de construcciones españolas, destacan los tirantes realizados de materiales compuestos de la Torre de Collserola (Barcelona 1992) diseñada por Norman Foster. En esta los 3 cables superiores están fabricados en aramida/epoxi. Cada uno de los tres cables está compuesto por 7 cables en paralelo de 56 mm de diámetro. La torre tiene una altura total de 288 metros.

Más recientemente (2003) se ha construido un puente de materiales compuestos del A.V.E. en la ciudad de Lérida desarrollado y construido por la empresa Fiberline. Este puente, es el más largo de Europa en su categoría. Sus dimensiones son 38 metros de longitud, 3 metros de ancho y 16 metros de altura. Sus elementos estructurales, a excepción de los pilares principales y la cimentación, están formados por perfiles de viniléster reforzado con fibra de vidrio. Su construcción se realizó íntegramente en el suelo, siendo posteriormente elevada al completo y colocada de una pieza sobre la estructura principal. Su construcción fue muy rápida, teniéndose que interrumpir la circulación de trenes tan sólo durante 2 horas (Sobрино y Pulido, 2004).

La fachada del Museo Reina Sofía de Madrid, fabricada por la empresa ICSA, ubicada al lado de la Estación de Atocha, es una muestra de la combinación de los materiales compuestos con el acabado, la estética y la libertad de formas. Hay que subrayar que no es una aplicación estructural, aunque debe soportar los esfuerzos característicos de una obra de fachada. Sus principales características son:

- Realizada en fibra de vidrio y espuma PIR. Resistencia al Fuego. Certificado por ensayo contra norma M1. Con acabado final de homogeneidad asegurada de la fachada completa. Pérdida de brillo menor del 5% después de ensayo de 500 horas. Mayor garantía para color y brillo, barniz incoloro de poliuretano, con aditivos para rayos ultravioletas y antigrafiti. Posibilidad de llevar a cabo eventuales reparaciones en obra sobre placas ya montadas o en fábrica sin que éstas se noten con respecto a las placas adyacentes.
- Facilidad para realizar reparaciones de ralladuras. Estabilidad geométrica y estructural con la adición de un sándwich de PIR. Repetitividad geométrica garantizada de los elementos.
- Mejor estabilidad dimensional de la pieza, al tratarse de piezas con radios grandes; en el laminado normal, existe la tendencia a la deformación.



- Si tenemos necesidad de colocar en el panel cualquier elemento metálico en el laminado, siempre tendrá tendencia a marcarse en la cara buena, por efecto de la diferencia de dilataciones y durezas de los dos materiales, este efecto con el brillo de la placa se hará cada vez mas acusado con el paso del tiempo.
- Dilatación de 1 sobre mil. Elevada durabilidad del producto. Excelente mantenimiento.
- Excelente manejo del panel en su manipulación y montaje, por la rigidez que presenta. Aseguramiento de la dureza superficial.

El Puente de la autovía del Cantábrico (Asturias) es una obra pionera debido a la utilización masiva de materiales compuestos en las vigas (fibra de carbono) y en los conectores tablero-vigas (fibra de vidrio AR). Sus características principales son:

- Longitud: 46 metros en cuatro claros o tramos. Ancho: 8 metros.
- Clasificación: AASHTO HS-25.
- Tres vigas longitudinales en fibra de carbono, con el uso de poliuretano en el interior de las vigas y conectores en fibra de vidrio AR. Columnas convencionales de concreto.
- Peso de las vigas muy reducido: 100 kg/metro lineal.
- Reducción drástica de las cargas muertas del paso superior. Fabricación en planta. Montaje en dos días.
- Se ha ensayado el paso superior con éxito tanto ante cargas estáticas como dinámicas.



El Puente de la autovía del Cantábrico

### Últimas tendencias de los materiales compuestos en la construcción.

En cuanto a últimas tendencias se refiere, en la industria de la construcción se le pide al material compuesto un mejor desempeño y menor costo. Se exige al proceso más rapidez, precisión y un menor costo. Todo ello pasa por una optimización de los moldes utilizados, por automatizar los procesos, en utilizar nuevas fibras y combinaciones, en combinar los materiales compuestos con materiales tradicionales y en potencializar las matrices reciclables y las fibras naturales (Miravete, 2002).

Además de que existen varias necesidades técnicas y diversas cuestiones que deben ser solucionadas, como:

- El desarrollo de estándares de diseño y pautas que sirvan de guía para los diseñadores y autoridades pertinentes.
- El diseño eficiente y la caracterización de juntas panel con panel y uniones de los paneles con los largueros.
- Comportamiento a fatiga de paneles y conexiones.
- Caracterización de la durabilidad bajo cargas mecánicas combinadas con ambientales.
- Mecanismos de falla y carga máxima, incluyendo modelos de pandeo local y global.

Una de las exigencias actuales principales para un material compuesto es que trabaje en las tres dimensiones (normalmente sólo lo hace en dos). Para ello se está experimentando en lo que se denomina la arquitectura textil. En función de cómo se dispongan las fibras se puede lograr un trenzado en 3D. Tan solo es cuestión de saber cómo tirar de la fibra y como girar las bobinas. Ejemplos de ello son el 3D Weaving, el Stitching y el 3D Braiding (Kamiya et al., 2000), aunque ninguno de ellos por el momento se ha desarrollado completamente (Mansó, 2004; Chiminelli, 2003).

# La Industria.

## Delimitación.

Hasta hace algunos años las industrias del mundo han utilizado materiales baratos que se encuentran en la naturaleza -hierro, yeso, concreto, madera- y los productos de la industria se han diseñado de acuerdo con las propiedades de estos materiales. Se han introducido numerosas modificaciones para obtener mejores rendimientos o propiedades distintas, pero ahora se está viviendo una época en la que cada vez se usan menos estos materiales naturales, porque las características de ciertas sustancias artificiales, como los plásticos, se ajustará por completo no sólo al rendimiento del producto terminado en uso, sino también a su comportamiento durante el proceso de fabricación y costos.

En general se crean aquellos materiales que se presten a la fabricación en serie, cuya eficiencia se vería muy limitada si tuviera que conformarse con las propiedades de los materiales naturales.

Actualmente se apunta a los polímeros como una de las áreas prioritarias de desarrollo mundial. Siendo las líneas de investigación más destacadas las siguientes:

- Diseños en la estructura molecular para que puedan elegirse y combinarse propiedades y funciones diversas.
- Materiales biocompatibles en el ámbito de la traumatología, odontología, cirugía, etc.
- Procesos de reciclado de plásticos que reduzcan su impacto ambiental.
- Materiales reforzados con una alta resistencia mecánica combinada con otras propiedades y funciones, como los nanotubos de carbono, elementos de dimensiones extraordinariamente pequeñas cuya resistencia es cien veces superior a la del acero.
- Control de la degradación al ser sometidos a condiciones ambientales severas de humedad, temperatura o resistencia al fuego.
- Los plásticos al ser materiales maleables y de baja densidad se emplean en campos muy diversos, como en aeronáutica (convenientemente reforzados con fibras de vidrio o de carbono), en automoción, en telecomunicaciones (fibras ópticas), etc.

- En el campo de la medicina las aplicaciones son también enormes: implantes, ortopedia, fármacos, para hacer plasma artificial, e incluso algunas proteínas que necesita el cuerpo humano también se pueden sintetizar artificialmente.

### **Tendencias mundiales en la tecnología de nuevos materiales.**

Se está difundiendo la tendencia de sustituir los materiales metálicos y sus aleaciones por los plásticos y sus compuestos debido a que se han estado creando nuevos métodos de análisis microscópico y macroscópico de estos materiales; así como nuevos procesos de conformación y tratamiento de los mismos, además de que se dará mucha importancia al reciclaje de los materiales con el objetivo de concluir el ciclo de vida de los mismos, de tal manera que los desechos lleguen a ser material de potencia concluida.

Las industrias del sector metálico, plástico y cerámico, deberán entrar en un proceso de transformación y reconversión hacia el uso de materiales compuestos, para poder conservar sus espacios de mercado frente a los productos que se están desarrollando, debido a que las propiedades físicas y mecánicas junto con las prestaciones que ofrecen los materiales compuestos superan en gran medida a los materiales tradicionales.

Además una de las principales tendencias en el campo de los materiales compuestos está relacionada con la reducción de costo, que no se puede relacionar solamente al mejoramiento de la tecnología de manufactura, sino que también se necesita la integración entre el diseño, la materia prima, los procesos de fabricación, herramientas.

Siendo principalmente los grandes retos de la industria el investigar las propiedades y micro-estructura de un material compuesto, crear una nueva teoría específica de la Resistencia de Materiales, que a su vez implicaría la creación de nuevos métodos de diseño, y lograr automatizar la fabricación de piezas de materiales compuestos y mejoramiento de sus especificaciones y normas de calidad.

Esto se deberá conseguir a través de la utilización de conocimientos interdisciplinarios, teóricos y experimentales, para caracterizar los nuevos materiales, controlando las propiedades sus propiedades, correlacionando la estructura microscópica con la macroscópica, sus mecanismos de daño a mediano y largo plazo, a la vez que se evalúan métodos y técnicas de producción de nuevos materiales a nivel industrial.

## **La industria en México.**

Aunque existen industrias relacionadas con los polímeros desde los 50's, en general su tecnología fue importada originalmente del extranjero, de manera que estas industrias tenían pocos incentivos para apoyarse en o soportar a grupos científicos. Desde el punto de vista de la ciencia esta situación mejoró en los 80's y los 90's, cuando algunos grupos industriales mexicanos (como Industrias Resistol, CONDUMEX y COMEX) crearon a su interior grupos de investigación y desarrollo, contratando investigadores en polímeros, propiciando y fomentando el desarrollo teórico y práctico de estos materiales.

Y aunque México representa uno de los 10 mayores mercados de plásticos a nivel mundial, con un consumo aproximado de 34 kg/habitante al año, es el segundo importador más grande de plásticos después de China, denotando que existe una demanda de productos y servicios que no es satisfecha por el mercado nacional, haciendo más difícil la exportación y avance del mercado.

El consumo del plástico en envase y en embalaje es mucho mayor en comparación al utilizado en la construcción, debido a que los patrones de diseño y las técnicas constructivas siguen favoreciendo a los materiales tradicionales, como el concreto y el acero, a consecuencia de la falta de información y el desconocimiento de nuevos materiales compuestos.

## **Programas y apoyos.**

La creación de los fondos sectoriales de Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para el apoyo de proyectos de investigación aplicados, especialmente aquéllos generados por necesidades de la industria, es un buen esfuerzo para promover el desarrollo tecnológico que podría convertirse en una gran herramienta de promoción de la vinculación si se asegura la continuidad y se establecen mejores mecanismos para favorecer relaciones academia-industria de largo plazo. Siendo de una mayor relevancia los mencionados a continuación, debido a su posibilidad de fortalecimiento de la industria e innovación en el campo teórico y práctico en el área de nuevos materiales.

- Programa de Innovación y Desarrollo Tecnológico del Plástico CONACYT – Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC).
- Programas de investigación que aborden tecnologías de uso generalizado, tecnologías de alto impacto y nichos tecnológicos selectos.
- Gestión tecnológica que apoye a las empresas de plásticos en la detección de necesidades específicas y su vinculación con Centros de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Centros CONACYT organizados “en red” con portafolios de productos y servicios “integrados” para atender a las empresas del plástico en cualquier parte del país.
- Sistema de información sobre la oferta tecnológica y de servicios para la industria.

### **Centros de Investigación.**

A continuación se mencionan los centros de investigación que existen en México que tienen una fuerte orientación a Polímeros describiendo algunos de los campos de estudio que se desarrolla.

El Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) en Saltillo, Coahuila, del sistema de centros CONACYT, es uno de los centros que concentra el mayor número de investigadores en el campo de los polímeros. En este centro participan más de 30 investigadores con doctorado en diversas áreas de especialización de las macromoléculas: síntesis, ingeniería de reacciones, procesamiento, aditivos para polímeros y biopolímeros. Su centro de información, su infraestructura experimental, la relación que mantiene con más de 200 Pymes anualmente y los intercambios que tiene con universidades y centros de investigación extranjeros lo hace un centro de gran potencial.

La Universidad de Guadalajara alberga también un grupo grande de investigadores con especialización en síntesis en sistemas dispersos (emulsión, microemulsión), procesamiento de polímeros y otros temas. Tales grupos se constituyen con investigadores de los Departamentos de Química y de Ingeniería Química de esa universidad.

En la Universidad Nacional Autónoma de México existen tres grupos que realizan investigación en este campo: en la Facultad de Química hay investigadores que trabajan en síntesis de polímeros, ingeniería de reacciones, reología o flujo y algunos aspectos fisicoquímicos de los polímeros, y más recientemente en el desarrollo de catalizadores para polimerización viviente controlada. En el Instituto de Investigaciones en

Materiales (IIM), existen grupos especializados en síntesis de polímeros y en su reología, así como en el desarrollo de materiales poliméricos compuestos, reforzados con diferentes tipos de partículas.

Además en el Instituto de Ciencias Nucleares se hace investigación en los efectos de la radiación sobre el proceso de polimerización y sobre los materiales poliméricos. Combinando los recursos humanos de la Facultad de Química, el IIM y el Instituto de Ciencias Nucleares, además de los investigadores de otros campos de la UNAM, como el (Física Aplicada y Tecnología Avanzada) FATA en Querétaro y la (Facultad de Estudios Superiores) FES Cuatitlán, el número total de investigadores en polímeros de esta institución se aproxima los 40, abarcando áreas muy diversas de investigación.

En el campo de materiales reforzados también destaca otro centro del sistema CONACYT, el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en la Ciudad de Chihuahua, donde además de este campo se investiga sobre la síntesis y las mezclas de polímeros. Otro grupo que trabaja en el desarrollo de materiales compuestos, entre otras áreas relacionadas con materiales poliméricos, es el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), del sistema de centros CONACYT.

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) cuenta con un grupo de Física de Polímeros en su división de Ciencias Básicas e Ingeniería. Este grupo trabaja, entre otras áreas, en diversos aspectos de Físicoquímica de Polímeros y en el entendimiento de algunas propiedades de estos materiales, así como en polímeros con propiedades únicas para ciertas aplicaciones, por ejemplo, agentes floculantes (agentes de sedimentación) y polímeros conductores.

Finalmente, existen múltiples centros en donde hay grupos relativamente pequeños o en proceso de consolidación concentrados en Ciencia de Polímeros, pero que también hacen investigación de primer nivel. Cabe mencionar como ejemplos los grupos en la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, los Institutos Tecnológicos de Tijuana, Zacatepec y Cd. Madero, la Unidad Querétaro del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), el Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC) en León, Guanajuato, la Universidad de Guanajuato, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y la Universidad Iberoamericana en Santa Fé.

Factores económicos.

Los materiales compuestos están alrededor de 10 veces más caros que el acero promedio, pero en los proyectos de refuerzo el material constituye en 20% del costo total, mientras que el 80% restante constituye a los costos de trabajo. Así el fácil manejo de los materiales CFRP y una aplicación a gran escala reducirían el costo considerablemente, además de que se evitarían los largos tiempos de instalación y el cierre de las vías vehiculares. Estos materiales han sido desarrollados y utilizados desde la década de los 60's para satisfacer las necesidades de un material con alto desempeño para la exploración espacial y la aeronáutica donde el costo no era un factor predominante. Por lo que estos materiales compuestos eran demasiado caros para conseguir un impacto mayor fuera de este nicho de aplicaciones.

Fue a partir de los 80's que comenzó la difusión, investigación e implementación de los materiales compuestos en diversos sectores industriales, consiguiendo así que el mercado se ampliara propiciando una reducción de costos de las materias primas y un mayor desarrollo en su producción; generando a su vez nuevos materiales y nuevas aplicaciones.

Actualmente las principales industrias donde se trabaja con los materiales compuestos son en el sector aeronáutico, automotriz, de transporte, en la construcción, deportes y bienes en general. El mercado mundial de los materiales compuestos ha crecido en un 5.7% anual desde 1994; teniendo en el 2000 una producción de 7 millones de toneladas y una previsión para el 2010 de mas de 10 millones.

Los materiales compuestos de *mass market* tienen un rango de costo de 1.5 a 5 euros por kilogramo debido a que principalmente utilizan resina de poliéster reforzada con resina de vidrio; y los de *high performance* van de los 3 a los 38 euros por kilogramo, dependiendo principalmente del tipo de fibras utilizadas y su porcentaje con relación a la resina.

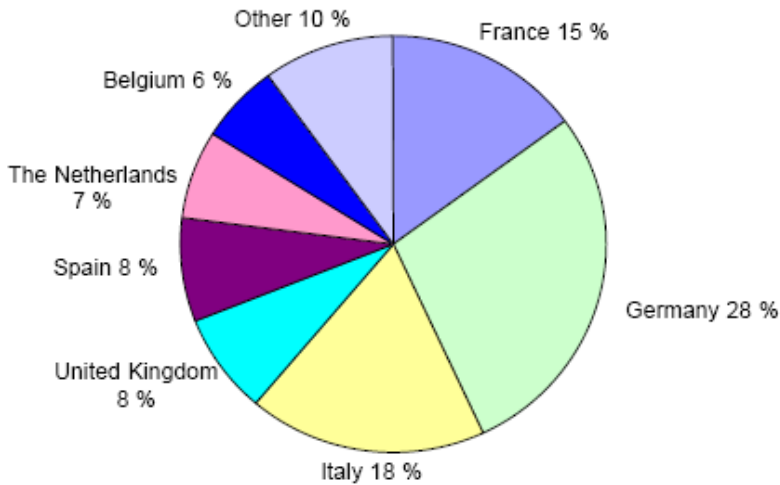
El mercado norteamericano cuenta con el 47% del procesamiento mundial con 3.4 millones de toneladas, seguido del mercado europeo, con el 28% (2millones de toneladas) y después el mercado asiático con el 23% (1.6 millones de toneladas).

El crecimiento del mercado en Asia y Europa es del 7% al año, mientras que en los Estados Unidos es del 4.5% y en América del Sur hay un incremento del 8% anual, teniendo un consumo del 2% del mercado mundial. Teniendo los compuestos termoplásticos un mayor crecimiento que los termofijos, con un 9% y 3%



anual respectivamente. Además de que los termoestables cuentan con dos tercios del mercado actual debido a su mayor difusión y procesos de manufactura mas extendidos.

División del mercado en Europa



Fuente: Estudio de Materiales compuestos –Nodal Consultants, 2000.

Los materiales compuestos de *mass market*, como la industria automotriz e ingeniería eléctrica y electrónica consumen un cuarto de la producción mundial; además de que estos sectores tienen una mayor restricción en los costos utilizan materias primas menos caras y de resistencia mas baja (como la resina de poliéster con fibra de vidrio) los diseñadores gozan de un rango de libertad con los compuesto de fácil mantenimiento, lo que implica que un costo adicional de 3 euros por kilogramo menos en el automóvil a largo plazo se convertiría en un ahorro de 1.5 euros cada 100 kilómetros. Mientras que en la industria eléctrica utiliza los materiales compuestos debido a que satisfacen las necesidades de seguridad, aislamiento eléctrico y transparencia en la onda electromagnética, junto con un largo ciclo de vida útil.

Los compuestos de alto desempeño son ampliamente usados en la aeronáutica; con un costo que llega a los 38 euros debido a su alto contenido de fibras de carbono. Esta industria constituye 22% del total del valor del mercado, mientras que en volumen sólo es el 4%. La disminución de 100 kilogramos en la estructura de un cohete espacial extiende la trayectoria de vuelo 100 kilómetros.

# Normatividad.

## Códigos y estándares.

Debido a la importancia del control de riesgos en cuestiones de seguridad pública, códigos y estándares para los materiales compuestos utilizados en las construcciones civiles han sido desarrollados desde la década de los 80's. Los materiales compuestos requieren un tratamiento separado para su autorización en esta normatividad debido a su bajo módulo y ductibilidad en comparación con los materiales convencionales como los metales.

Sin estos códigos y estándares sería difícil que los materiales compuestos pudieran hacer su incursión mas allá de limitadas investigaciones y proyectos demostrativos. Métodos de pruebas estandarizadas y esquemas de identificación de materiales minimizan las incertidumbres en el desempeño y especificación de los materiales compuestos.

Los códigos permiten que las estructuras contengan materiales compuestos en su diseño, construcción y operación con seguridad y confianza. Actualmente el mayor logro que se ha obtenido consiste en el uso de estos materiales para el refuerzo de nuevas estructuras y la reparación y ajuste de estructuras existentes.

## Códigos críticos y el desarrollo de Estándares.

Basados en experiencias obtenidas de proyectos pasados, varias guías para el diseño han sido publicadas; siendo uno de los más importantes el desarrollado por el Instituto Americano del Concreto, llamado 440.1R-06 *Guía para el Diseño y Construcción de Concreto Reforzado con Barras de FRP*. En Canadá se han publicado dos importantes estándares de diseño, incluyendo el *Código de Diseño Canadiense para Puentes de Autopistas* y el *CSA S806-02 Diseño y Construcción de Componentes de Edificios con Polímeros Reforzados con Fibras*. Estos junto con otros documentos a nivel internacional ofrecen a los diseñadores de puentes guías de diseño usando una metodología tradicional de diseño de concreto reforzado con ciertas variaciones para demostrar la diferencia en las propiedades mecánicas de las barras de FRP.

Recientemente el Instituto Americano del Concreto ha publicado consideraciones y especificaciones, escritas en un lenguaje obligatorio con pruebas provisionales, evaluación y aceptación de las barras de FRP a la vez que se describen los materiales constitutivos permisibles, límites máximos y requerimientos de desempeño mínimo para ser usados en el refuerzo del concreto. Las especificaciones de construcción cubren el uso de barras de FRP, su colocación, preparación, reparación, su corte en obra y la aplicación del concreto. Estas especificaciones permiten a los diseñadores a realizar una cuantificación preliminar además de que ayuda a los ingenieros y contratistas a tener un mejor control en obra.

El desarrollo de códigos clave y estándares ha logrado una mejora en la aceptación de los materiales compuestos. Cada año mas puentes son construidos con refuerzos de FRP. Con un desempeño y durabilidad documentados es posible construir puentes con una vida útil de 75 a 100 años.

### **Japón.**

Los esfuerzos para producir especificaciones para el diseño y construcción de estructuras de concreto con materiales compuestos comenzó en este país en los 80's. Estos son algunos ejemplos de especificaciones para refuerzos internos completados a mediados de los 90's:

- Recomendaciones para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto utilizando Materiales Reforzados con Fibras Continuas.
- Pautas para el Diseño Estructural de Construcciones de Concreto Reforzadas con Materiales Compuestos en Japón.
- Métodos de Diseño para Estructuras de Concreto Pretensadas Reforzadas con Materiales Compuestos.

El primer punto se referenció como recomendación, siendo publicada por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles en 1997, además de que tiene la intención de ser para estructuras de concreto que no sean edificios. Estas recomendaciones incluían especificaciones de calidad y métodos de prueba para materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de carbono, así como recomendaciones para el diseño y construcción con dichos materiales.

Las especificaciones de calidad para los refuerzos definían las características requeridas y sus propiedades, y servían de guía para el desarrollo de nuevos refuerzos para aplicaciones practicas. Las características de

los refuerzos incluían tipo de fibras y su configuración; la especificación de las propiedades indicaba el porcentaje de fibras, área de refuerzo en la sección transversal, fuerza a la tensión garantizada, módulo de tensión, elongación, fuerza a la ruptura por fluencia y durabilidad, entre otros. La mayoría de estas propiedades especificadas estaban determinadas en base a pruebas descritas en las recomendaciones. (Uomoto 1997).

El diseño y construcción recomendados estaban basados en las Especificaciones Standard para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles de 1986. Mas detalles son presentados por autores como Machida (1995; 1997) y Tsuji (1997).

El segundo y tercer punto se referenciaron para estructuras de edificaciones. Estas especificaciones fueron desarrolladas en 1993 como un resultado final del proyecto de investigación y desarrollo "El uso efectivo de compuestos avanzados en la construcción", subsidiado por el Ministerio de la Construcción del Gobierno Japonés. Se pueden encontrar detalles publicados por el autor Sonobe (1995, 1997).

Después del terremoto de 1995 en Hyogoken-Nanbu el uso de placas exteriores de fibra de carbono para la rehabilitación sísmica de columnas de concreto reforzado incrementó ampliamente en Japón; mientras que anteriormente su uso había sido principalmente para la reparación.

Las pautas de diseño para la aplicación de placas de FRP en soportes y columnas de puentes son los siguientes:

- Pautas para el Diseño y Construcción para la Rehabilitación de Columnas de Concreto Reforzado usando Placas de Fibras de Carbono, de la Asociación de Caminos de Japón.
- Pautas para el Diseño y Construcción para la Rehabilitación Sísmica de Columnas de Vías Ferroviarias, del Instituto de Investigación Técnica de Trenes.

Estas guías incluían ecuaciones para la evaluación de los efectos de las placas de FRP en la capacidad a cortante y la ductibilidad. Pautas similares también son presentadas para columnas de edificaciones y pilares centrales de túneles subterráneos.

Métodos para pruebas estándar han sido desarrollados para placas de FRP por el Instituto del Concreto de Japón (1998). Estos métodos incluyen pruebas de propiedades a la tensión y pruebas de fuerza de unión.

## **Canadá.**

El uso de FRP en aplicaciones de ingeniería civil en Canadá comenzó a finales de los 80's cuando la Sociedad Canadiense para la Ingeniería Civil creó un Comité Técnico para el Uso de Materiales Compuestos Avanzados en Puentes y Estructuras, siendo subsidiado por el Gobierno Federal Canadiense y conduciendo al establecimiento de la Red de Trabajo de Materiales Compuestos Avanzados en Puentes y Estructuras en 1992, esta Red patrocinó varios reportes en Japón, Europa y los Estados Unidos, documentando el estado actual de este campo (Mufti, 1991).

En 1995 el Gobierno Federal estableció la Red de Trabajo de Centros de Excelencia en la Detección Inteligente para la Innovación en las Estructuras (ISIS por sus siglas en inglés), y una de las áreas en las que se enfocó fue en el uso de materiales compuestos para nuevas estructuras y la rehabilitación de estructuras existentes. ISIS publicó, y sigue publicando, varias pautas de diseño para refuerzos internos y externos con FRP, participando en varios Comités de Códigos y Estándares, además de patrocinar varias conferencias nacionales e internacionales.

## **Estados Unidos.**

En este país se ha tenido un largo y continuo interés en los refuerzos para las estructuras de concreto, propiciando un desarrollo acelerado e investigación en el uso de los FRP, comenzando en los 80's a través de la iniciativa de la Fundación Nacional de Ciencia y la Administración Federal de Carreteras, que patrocinaron la investigación en diversas universidades e instituciones.

En 1991 el American Concret Institute (ACI) estableció el Comité 440 "Refuerzos con FRP", que ha publicado reportes del estado actual de refuerzos para estructuras de concreto con FRP desde 1996, junto con documentos como "Guía para el diseño y construcción de concreto reforzado con barras de FRP" (2001), "Guía para el diseño y construcción de sistemas externos de FRP para el refuerzo de estructuras de concreto" (2001), "Durabilidad de FRP para estructuras de concreto" (2002) y "Guía para el diseño y construcción de miembros de concreto pretensado con FRP" (2003).

## **Europa.**

Aquí la investigación en el uso de FRP comenzó en la década de los 60's. En 1993 se estableció el programa Paneuropeo de investigación (EUROCRETE) y cerrando en 1997. Este programa estaba dirigido al desarrollo de refuerzos con FRP para concreto, e incluía socios de del Reino Unido, Suiza, Francia, Noruega y los Países Bajos.

El Grupo de Trabajo "Refuerzos de FRP para Concreto Estructural" de la Federación Internacional del Concreto Estructural se creó en 1993 con el objetivo de establecer pautas para el diseño siguiendo el formato del Comité Paneuropeo, dividiéndose en grupos para la prueba de materiales y su caracterización, concreto reforzado, concreto pretensado, refuerzos exteriores, mercadeo y aplicaciones. El Grupo de Trabajo consistía en miembros de universidades europeas, institutos de investigación y compañías involucradas con los refuerzos de FRP para concreto.

En el Reino Unido la Institución de Ingenieros Estructurales ha publicado una guía para el diseño de estructuras de concreto reforzado con FRP. Esta guía está principalmente basada y referida a los códigos de diseño británicos; adoptando una aproximación similar a la que se tiene en Japón y Canadá.

### **Pruebas.**

Para que se pueda lograr una producción viable de FRP se necesita una gran cantidad de pruebas y validaciones. Estos métodos de prueba son importantes en los nuevos materiales ya que posibilitan la verificación de las propiedades individuales y le dan a los diseñadores la seguridad de que el diseño será propiamente construido.

Con pruebas estandarizadas se puede determinar fácilmente si un proveedor otorgará las propiedades requeridas según el diseño y si las barras tendrán a largo plazo el desempeño anticipado. Los procedimientos de pruebas estandarizados también eliminan los "sistemas" de FRP de ciertas marcas, permitiendo al diseñador aceptar múltiples ofertas de varios distribuidores; además de que facilitan la determinación de de propiedades relevantes y le dan a los constructores la confianza de que las barras satisfarán las propiedades que fueron asumidas para los cálculos de diseño.

La Red de Investigación Canadiense ISIS ha tomado la delantera en esta área al publicar las *Especificaciones para la Certificación de Productos de FRP para el Refuerzo de Estructuras de Concreto*, separando las pruebas y la caracterización de una barra individual de FRP en dos categorías que se pueden

simplificar en el desempeño a corto y largo plazo; siendo las siguientes pruebas algunas de las necesarias para la evaluación en un proyecto:

- La fuerza de unión a los bloques de concreto tensado.
- Fuerza longitudinal a cortante.
- Fuerza de los dobleces de las barras y sus estribos.
- Tensión longitudinal, módulo de elasticidad y torsión a bajas temperaturas.
- Fuerza a la flexión, a la compresión y su coeficiente de expansión térmica.
- Vacio contenido.
- Absorción de la humedad.
- Resistencia alcalina en soluciones de un alto pH con y sin carga.
- Fuerza a la ruptura por agrietamiento y Fuerza a la fatiga.

#### **Futuros trabajos, tendencias y necesidades.**

Desde un punto de vista técnico la necesidad de los códigos y estándares especializados para materiales compuestos se muestra desde la diferencia fundamental de las propiedades mecánicas y físicas en comparación con los materiales convencionales de construcción. El desarrollo de códigos y pautas para el uso de refuerzos con FRP en estructuras de concreto ha sido predominante desde hace décadas, y se espera que continúe así por varios años más. Donde mucha de esta actividad está motivada por la inmediata necesidad de mejores materiales económicos a largo plazo para la reparación y rehabilitación de estructuras obsoletas, degradadas o localizadas en zonas sísmicas.

En otros casos, como con las nuevas construcciones, donde la necesidad de nuevos materiales no siempre se enfoca desde un punto de vista a largo plazo, los códigos facilitarían su uso, mostrando eventualmente los beneficios del ciclo de vida de los materiales compuestos. Además de que se expresa una falta de creación y desarrollo de normas en la implementación de cubiertas de puentes y elementos autoportantes resistentes por forma, en los que se muestra una creciente investigación.

# Evaluación no destructiva.

## Definición.

Se puede definir como el uso de técnicas no invasivas de inspección y análisis para determinar cualitativamente la integridad, propiedades o características de un material, componente o estructura. Así, la END no sólo comprende todo el proceso de inspección no destructivo, sino también el análisis de los resultados de esta inspección para calificar la condición estructural del componente evaluado.

Las fallas de un elemento se atribuyen generalmente a dos causas: a los defectos preexistentes de manufactura, o al daño inducido durante el servicio. El primer tipo de causa resulta fundamentalmente de la negligencia, el desconocimiento o los errores humanos en alguno de los procesos de diseño, selección de materiales, manufactura o controles de calidad. En cambio, la segunda causa de falla, que es más difícil prevenir por presentarse en nuevos diseños y/o nuevos materiales, se debe a comportamientos desconocidos o condiciones que no se pudieron anticipar o prever durante el diseño.

En ambos casos, las fallas son posibles de superar con la utilización del criterio de diseño con tolerancia al daño y la aplicación adecuada de la evaluación no destructiva, que suelen asegurar la operación de una estructura por determinados periodos de servicio.

El criterio de diseño con tolerancia al daño se refiere a la habilidad de una estructura o un elemento estructural para resistir la presencia de defectos o grietas durante un tiempo determinado; esto es, la capacidad para seguir operando mientras una grieta o defecto sea menor a cierto tamaño crítico sin que su integridad estructural se vea comprometida.

De manera complementaria, la evaluación no destructiva proporciona la información actualizada de la situación en que se encuentra en determinado momento, de manera que identifica la presencia de diversas fallas, su localización y tamaño. A partir de esa información y de un análisis de las condiciones de operación, propiedades del material y el diseño, en el que está incluido el mecanismo de daño permisible, se establece qué tan críticas son las grietas y en caso de no serlo, predecir su comportamiento y estimar cuánto transcurrirá para que lo sean. De esta manera se define un tiempo de vida remanente o se establece un



periodo de inspección que permite dar seguimiento al desarrollo de las grietas, y fijar programas de mantenimiento.

La evaluación no destructiva proporciona el primer paso para asegurar la integridad estructural mediante la identificación de componentes dañados que deben ser reparados o sustituidos. Como todas las técnicas de inspección tienen sus limitaciones y es posible que exista un número de grietas o defectos que no se hayan detectado; el diseño con tolerancia al daño se convierte en la segunda línea de defensa contra las fallas catastróficas incorporando configuraciones y materiales resistentes a esas grietas indetectables. Es por esto que la tolerancia al daño se considera también como la medida o calificación del grado de protección de una estructura ante situaciones o condiciones de falla no anticipadas, que pudieran resultar catastróficas.

Cuando se utiliza adecuadamente la evaluación no destructiva y el análisis de crecimiento de grietas en los materiales, es posible definir una estrategia para retirar del servicio un componente mecánico o estructural, que teóricamente, ocurrirá después de un largo periodo de servicio.

Los tiempos o periodos de inspección se pueden calcular considerando el tamaño más grande de las grietas que se pudieran dejar de detectar, y un factor de seguridad. Este proceso, en principio se puede repetir un número indeterminado de veces, pero en la práctica se suspende cuando el costo de inspección y reparación es más alto que el de reemplazo. Es evidente que el criterio al que al inicio de la sección se hace referencia, es de carácter técnico-económico. La clave fundamental del procedimiento es la confiabilidad de la inspección no destructiva para conocer el tamaño de grieta más grande aun cuando no sea detectada, y de ahí calcular la vida residual del componente.

En toda END se deben tener en consideración dos aspectos fundamentales: la capacidad de la técnica para la Inspección No Destructiva, y el fundamento teórico de la ciencia de los materiales e ingeniería mecánica estructural para el análisis. El éxito de una END depende, por un lado, de una adecuada selección e interpretación de la técnica empleada en la inspección.

Por el otro lado, la selección y aplicación adecuada del marco teórico es imprescindible, ya que es el sustento para el análisis. Para lograr este éxito es prioritario contar con información *a priori* que permita conocer el tipo de fallas que se pueden presentar y así tener elementos que faciliten la selección del método

no destructivo más adecuado, considerando para ello las capacidades propias del método a través de los parámetros de sensibilidad y confiabilidad.

De manera general, se puede decir que las técnicas no destructivas más comunes son: inspección visual, radiografía, ultrasonido, corrientes de inducción, partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

Para detectar defectos internos se emplean los Rayos X o Gamma (radiografía), o la emisión acústica (ultrasonido). Cuando se trata de defectos superficiales pequeños, que al no detectarse con una inspección visual, se pueden identificar midiendo cambios en la conductividad eléctrica, o examinando los cambios en las corrientes inducidas por campos magnéticos. Por su parte, las fallas en materiales ferromagnéticos se localizan magnetizando al elemento y observando alteraciones en campo magnético.

Cuando se emplea cualquiera de las técnicas de inspección destructiva es importante considerar que hay un límite en el tamaño del defecto que pueden identificar con un alto grado de confiabilidad. Existe un gran número de factores que influyen en esto, por ejemplo, cuando los defectos son demasiado pequeños, no es fácil detectarlos, a menos que se tengan condiciones de inspección muy favorables.

No sólo las condiciones ambientales para una inspección son importantes, sino también factores que incluyen la selección de la técnica de inspección; la calibración y el manejo del equipo utilizado; la preparación del espécimen; el tipo de falla y su orientación. Es importante destacar que el objetivo de una Inspección No Destructiva, no es determinar el tamaño más pequeño que se puede encontrar, sino más bien, establecer el tamaño de defecto más grande que se puede dejar de detectar.

### **Efectividad.**

La evaluación no destructiva (END) no comprende solamente el proceso de inspección utilizando varias técnicas no destructivas para localizar y medir uno o varios defectos en un elemento estructural o mecánico, sino también todo un análisis con el que se da una interpretación desde el punto de vista estructural o mecánico del comportamiento en cuestión, considerando la localización y características del defecto identificado y las condiciones de carga a las que está sometido. Todo ello con objeto de calcular la vida útil o remanente en las condiciones presentes y futuras de operación, y establecer un criterio cuantitativo de la integridad del elemento.

Hay diferentes niveles de evaluación de acuerdo con el grado de detalle del análisis que se lleve a cabo; sin embargo, existe una marcada diferencia entre lo que corresponde a una END y lo que propiamente es una inspección no destructiva. Esta última, únicamente corresponde a la primera etapa de la END que considera una o varias técnicas no destructivas para identificar y localizar defectos superficiales o dentro del material constitutivo del componente que se analiza. La caracterización de los defectos, tanto superficiales como internos en un elemento, no determinan por sí mismos la capacidad de trabajo y operación del mismo; para ello, es necesaria una segunda etapa de análisis que regularmente se basa en conceptos de mecánica del medio continuo y mecánica de la fractura con objeto de delimitar la acción de los defectos en el comportamiento estructural en determinadas condiciones.

De lo anterior se puede establecer que la efectividad de una END no depende solamente de la capacidad de la técnica no destructiva, sino también de la precisión y fidelidad del marco teórico que se emplea en el análisis.

La efectividad de una técnica se podría determinar en términos de dos parámetros: la sensibilidad, y la confiabilidad de la misma. La sensibilidad se refiere principalmente a la resolución mínima del método que se relaciona con el tamaño más pequeño de defecto que se puede detectar. Por otra parte, la confiabilidad se refiere a la certeza con que se localizan o identifican defectos de cierto tamaño.

No obstante, el empleo de ambos parámetros parece razonable para calificar una técnica de inspección no destructiva, es necesario precisar su interpretación cuantitativa al existir varios factores adicionales que no dependen de la técnica en sí, y que afectan los resultados de manera importante.

Un método ideal para la inspección no destructiva debe ser barato, preciso y confiable; y aplicarse tanto en la planta para calificar a un componente en las distintas etapas de su fabricación, como en campo para calificarlo estando en servicio. En general, las técnicas de inspección no destructiva trabajan bajo el principio de que se aplica algún tipo de estímulo sobre el componente que se evalúa y mide la respuesta de éste como resultado del estímulo. El objeto de la inspección es interpretar la respuesta e identificar cierto tipo de anomalía que se asocie con algún defecto o grieta en el componente.

Aunque existen factores externos que alteran la efectividad de una técnica empleada, y de manera general, estos factores se pueden dividir en cuatro:

- Los factores geométricos corresponden a aspectos como la geometría del componente y su tamaño, así como a la orientación y localización de la falla; por ejemplo, con la técnica de ultrasonido, la orientación es importante, ya que cuando es paralela a la dirección del haz ultrasónico resulta difícil detectarla; mientras que la probabilidad de detección es muy alta si es perpendicular. Por otro lado, la ubicación influye de manera significativa pues en general una técnica de inspección resulta muy buena para grietas superficiales, pero no interiores o viceversa. En cuanto a la forma del componente, es fundamental tomar en cuenta todos los detalles del mismo, ya que pudieran ocultar u obstruir la detección de defectos.
- Los factores humanos son muy variados, pero fundamentalmente se refieren al inspector en sí mismo. La actitud mental es esencial para un buen resultado, pero también lo son el estado de ánimo, el cansancio y la salud. La capacitación y la experiencia son factores que ayudan al éxito de la inspección; en ocasiones se pueden tener expectativas sobre lo que se puede encontrar, creando una tendencia que llega a afectar de forma negativa o positiva al trabajo.

El efecto normalmente es negativo cuando se enfoca la inspección a un tipo de falla particular y se da poca atención a otras posibles averías; por el contrario, es positivo cuando existe un conjunto de experiencias para conocer los puntos débiles y hacer que se concentre más la inspección en ellos.

- Los factores técnicos comprenden la selección de la técnica de inspección, la calibración del equipo, el uso apropiado del mismo, y la correcta aplicación de la metodología de inspección. La selección de una técnica se refiere a determinar un método de excitación y medición del componente, como puede ser escoger entre rayos X, ultrasonido, emisiones acústicas o corrientes parásitas.

La selección depende del problema potencial que se quiere detectar y de un conocimiento detallado de las capacidades y limitaciones de cada técnica. La metodología se refiere al procedimiento mismo que se utilizará; por ejemplo, en ultrasonido se puede aplicar el haz recto o el haz angular.

- Los factores ambientales como el clima, la humedad, el ruido, la accesibilidad o la temperatura ambiente, influyen también de manera importante, tanto en el inspector, como en el equipo y en las condiciones específicas de trabajo; de ahí que deben ser siempre considerados, y en la medida de lo posible, tener las mejores condiciones de trabajo.

Técnicas Superficiales.

PRUEBA	TIPO DE DEFECTO	SE PRESENTA EN:	VENTAJAS	LIMITACIONES
Líquidos penetrantes	Grietas, vacíos, porosidades y uniones entre piezas laminadas, picaduras superficiales	Soldadura, forja, maquinados superficiales, fundición, grietas en componentes sujetos a fatiga o esfuerzos debido a la corrosión	Bajo costo de aplicación, fácil de implementar, portátil, fácil de interpretar; tiene alta sensibilidad para discontinuidades abiertas y de poca profundidad	La falla debe estar abierta en la superficie; requiere inmersión del líquido penetrante; la profundidad es difícil de estimar; puede dar indicaciones falsas por irregularidades
Corrientes de Eddy	Grietas, vacíos, variación en la composición de las aleaciones o del tratamiento térmico, medición de espesores	Tuberías, variación en las aleaciones, para medir espesores en recubrimientos.	Portátil, lectura inmediata	Sensible a la geometría; baja penetración, superficial, difícil de interpretar; cambios de conductividad afectan las condiciones de lectura
Partículas magnéticas	Grietas, vacío, defectos de laminación y unión entre piezas laminadas	Fundición ferromagnética, forja, extrusión, laminación, rolado	Requiere poca preparación, limpieza; es un método rápido y económico; revela discontinuidades que no afloran a la superficie; cuenta con amplio espectro de alternativas de aplicación	Se aplica sólo a materiales ferromagnéticos; detecta fallas próximas a la superficie; sólo detecta discontinuidades perpendiculares al campo magnético
Imagen infrarroja	Detección de pequeñas diferencias en temperatura que correlacionen con defectos del material o desempeño de los materiales	Detecta corrosión en la estructura de aeronaves	No requiere contacto superficial; detecta condiciones que afectan la transferencia o generación de calor en el material; capacidad para realizar inspecciones en tiempo real	Su equipamiento es costoso; los resultados son afectados por las condiciones ambientales y de la emisividad superficial

Técnicas volumétricas.

PRUEBA	TIPO DE DEFECTO	SE PRESENTA EN:	VENTAJAS	LIMITACIONES
Radar de penetración	Grietas, vacíos, localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), perfiles transversales del material, laminaciones, medición de espesores	Concretos, pavimentos, materiales compuestos, y materiales estructurales	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida; opera a la velocidad del tráfico cuando inspecciona pavimentos y puentes; genera imágenes en 2D y 3D	Muy alto costo de operación del equipo y de operación; el procesamiento de la información es complejo; no detecta defectos o grietas muy pequeñas
Termometría del infrarrojo de banda dual	Localización de objetos en la parte interna (barras de refuerzo), defectos estructurales, grietas, laminaciones, vacíos	Concretos, pavimentos, estructuras de concreto reforzado	Cubre una gran área de inspección de manera muy rápida. Permite mediciones de los elementos internos de una estructura	Alto costo, baja sensibilidad para detectar grietas; variaciones en las propiedades del material afectan los resultados; genera imágenes en 2D de 3D
Emisiones acústicas	Grietas, velocidad de crecimiento de grietas, fatiga y corrosión	Metales, aceros estructurales, estructuras de concreto	Localiza puntos de falla con alta precisión; determina parámetros para estimar vida útil de los elementos	Costo relativamente elevado; análisis e interpretación de datos son complejos
Radiografía	Grietas, inclusiones, porosidad. Uniformidad del material	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, componentes electrónicos, materiales compuestos	Detecta fallas internas; usada en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa	Alto costo de operación; no puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; se obtienen impresiones en 2D de estructuras en 3D
Ultrasonido	Grietas, adherencia, porosidad, inclusiones, defectos de laminación, corrosión, medición de espesores	Soldadura, aleaciones, adherencia entre materiales, difusión en el pegado, materiales compuestos, tuberías y tanques a presión	Detecta defectos internos y los muestra en 3D; utilizado en diferentes tipos de geometría y materiales, se obtiene un registro permanente; obtiene información cualitativa y cuantitativa	Difícil de aplicar en geometrías complejas; generalmente requiere de agua u otro tipo de acoplante; algunas veces se dificulta la interpretación
Tomografía computarizada	Grietas, vacío, inclusiones, porosidad, uniformidad del material, integridad de ensamble, alineación de componentes	Fundición, forja, partes maquinadas, soldadura, componentes electrónicos, materiales compuestos	Detecta fallas internas; usado en un amplio rango de geometrías y tipos de material, se obtiene una impresión permanente; se obtiene información cualitativa y cuantitativa.	Alto costo de operación; no puede detectar defectos muy pequeños ni grietas muy pequeñas; largo tiempo de inspección

# Problema inverso (IP).

En términos generales, un problema inverso consiste en la obtención de las causas que producen los efectos observados, a partir de cierta información de los efectos. Esto requiere la resolución en sentido inverso del modelo que representa el fenómeno completo que se quiere estudiar

## Delimitación del problema.

Tomando como base el trabajo realizado por Ravi Mittal (alumno de doctorado en la Universidad de Granada, España) en el 2006, que consiste en una simulación numérica utilizando un modelo en Elementos Finitos de la propagación de ondas en sólidos de múltiples capas para caracterizar propiedades mecánicas de diversos materiales en base a medios no destructivos en lenguaje de programación de Matlab, pero su propuesta era para capas de materiales como la madera, concreto y ciertos tipos de plásticos; por lo que se realizó una modificación al modelo para que fuera capaz de hacer una serie de simulaciones de la respuesta de los materiales compuestos a la propagación de ondas ultrasónicas para relacionar dicha respuesta con el daño producido por el impacto de un elemento macizo en el material, y así utilizar estos datos como parámetros en la resolución de problemas inversos en la Evaluación no Destructiva.

Partiendo de los mecanismos de falla, en particular los micromecánicos, para estudiar modelos de daño continuo aplicado a una delaminación modelizada como degradación de un estrato delgado, que corresponde con el volumen de la interface en la que se genera la delaminación entre capa y capa.

El modelo de daño consiste en unas leyes constitutivas del material (relaciones entre tensiones y deformaciones) alterando las propiedades elásticas según unos parámetros de daño, encaminado a realizar un sistema de monitorización localizado en los puntos críticos de una estructura por transmisión de ultrasonidos transversalmente a la placa de material compuesto, junto con un modelo que relaciona dicha variación dentro del estrato que se está degradando con la vida remanente del elemento estructural.

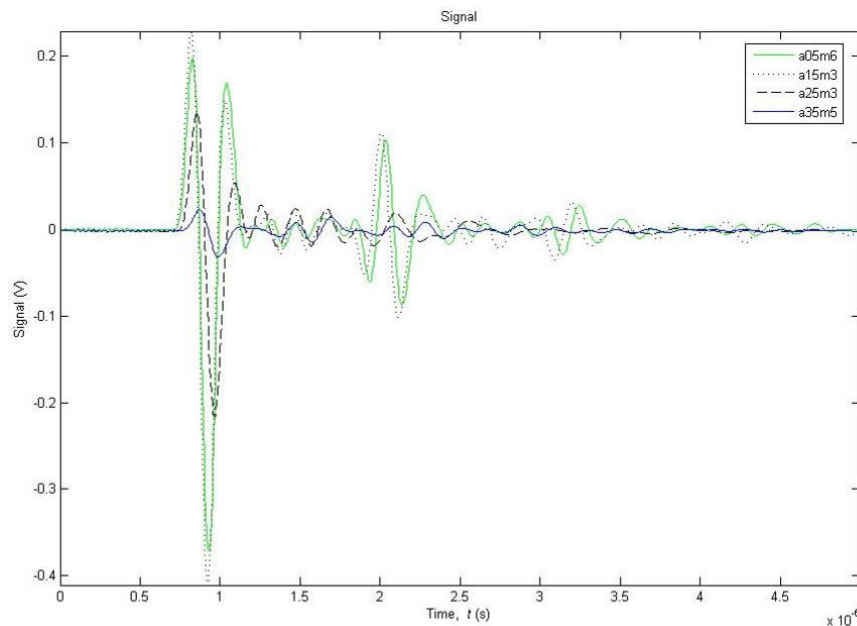
Del programa producido por Ravi se utilizó un conjunto de módulos de librerías, además de crearse nuevos directorios para satisfacer las necesidades de programación y las leyes constitutivas de los materiales compuestos.

A groso modo se presenta el funcionamiento de cada módulo del programa modificado para la obtención del daños producido y simulado en los especímenes de material compuesto:

- Fpx\_night** es la raíz de los demás módulos, inicia el ciclo de la simulación y da paso al bucle cuando se inicia el programa.
- Fpx\_experiment** toma los datos obtenidos por el osciloscopio y los convierte en una observación de las muestras experimentales, dando el modelo a comparar con el simulado.
- Fpx\_model** toma los parámetros que se le asignaron, pudiendo ser datos experimentales o de un modelo creado en FEAP (en este caso son cuatro parámetros, siendo uno para la primera capa, y los demás para la unión entre las diferentes laminas) para producir el modelo y así simular el daño hecho a impacto.
- Fpx\_mea** toma el modelo producido en FEAP (con características de contorno, geometría, densidad, módulo de Young, etc.) para generar una observación simulada.
- lp\_residual** resta la observación simulada a la observación experimental para obtener el residuo de cada observación dada, entendiendo que mientras menor sea el residuo mas aproximada será la observación simulada a la real.
- lp\_fun** define la función de coste (la diferencia entre la observación experimental y la simulada) normalizando el residuo a partir de su discretización convirtiéndolo de un vector a una función escalar, para así poder hacer una comparación entre las dos observaciones.
- lp\_sear** busca que valores del modelo de FEAP disminuyen la función de coste mínimo, indicando que parámetros son los que mas se aproximan a definir los valores obtenidos por la observación experimental y así poder definir en donde se hizo el daño y en que medida disminuyeron los parámetros del materia.



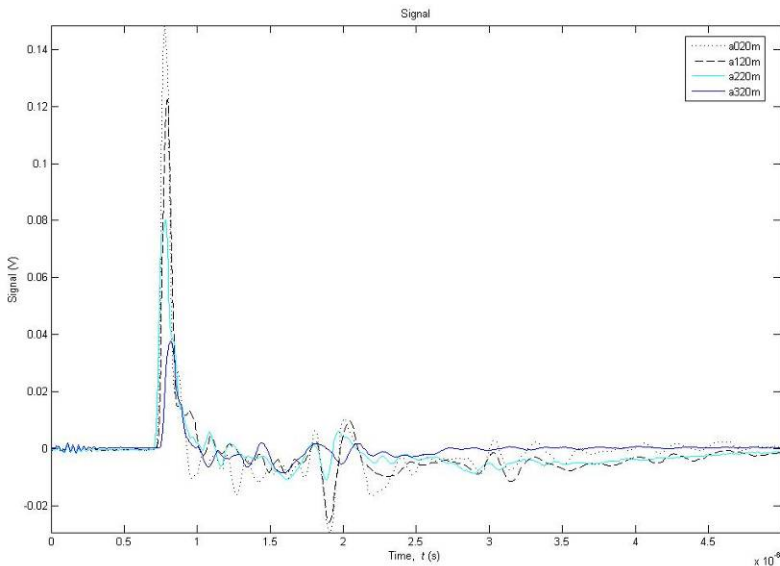
Con este programa y un Modelo en Elementos Finitos se hizo una simulación de la señal experimental para, en primera instancia hacer la calibración del modelo hasta obtener una señal sintética semejante a la experimental, y después hacer una serie de simulaciones de la respuesta del material compuesto y del efecto del daño, según el modelo de degradación de estratos, para determinar que parámetros son los que se afectan con el daño a impacto, y finalmente se hace la comparación del efecto experimental del daño generado con el simulado.



En este gráfico se muestran las señales obtenidas del espécimen A con 3 niveles de daño, siendo la nomenclatura la siguiente:

La primer letra se refiere al espécimen, el primer dígito al número con que se le aplicó daño al material, siendo el cero una medición sin daño, el siguiente se refiere a la frecuencia del transductor y el último número a la medición tomada de esa serie.

Siendo la medición a15m3, significa que es una medición del espécimen A, con un daño hecho por el impactador 1 (de 0.647 Joules), con una frecuencia de 5 megaHertz y es la medición número 3 de 5 de las tomadas con estas características.

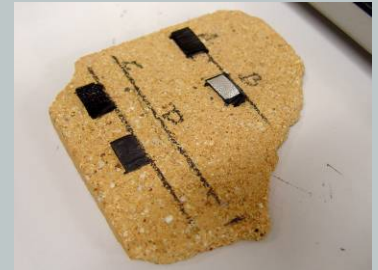


**Caracterización de los especímenes.** Debido a que no se conocía el tipo de material compuesto con que se contaba, se hizo la caracterización (definición de las propiedades físicas) de 4 muestras distintas de materiales compuestos a través del quemado de la resina en un horno a 500°C durante aproximadamente 16 horas, para así poder contar el número de capas que tenía cada espécimen, pesar las fibras de carbono de cada capa y medir los ángulos de dichas fibras con respecto al eje longitudinal de la muestra; esto se hizo mediante la introducción de la imagen en el programa Autocad, marcando el eje de referencia y midiendo así el ángulo de cada capa, además de que se midió el espesor de cada capa por medios digitales.

Todo esto para hacer la formulación y cálculo tanto del volumen, peso y densidad de la resina, junto con las fibras de carbono de cada espécimen, para obtener a partir de ahí su Fracción de Volumen de Fibra de cada capa y de cada espécimen, y poder calcular sus propiedades físicas y mecánicas.



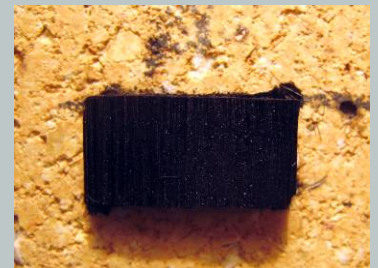
*Especímenes antes de sin daño.*



*Muestras de los especímenes después de ser colocados en el horno (sin resina).*



*Capas separadas de cada muestra para pesarlas.*



*Muestra A. De la serie de fotos para medir el ángulo de las capas.*



*Muestra A. Foto para medir el espesor de las capas.*

Debido a que el espécimen A presenta una estructura simétrica se optó su utilización en los primeros experimentos, por lo que se calculó la densidad media y la media del porcentaje de fibras tanto de la capa 1 y 5, así como de la 2 y 4, siendo estos los valores utilizados para las simulaciones realizadas; además de que se calculó el módulo de Young sin fibras para utilizarlo en la interfase entre capa y capa (debido a que en la unión no presentan fibras).

Muestra A

Peso total	0.2751 mg
Volumen total	191.136 mm <sup>3</sup>
Densidad total	1.4392 g/ml
Peso carbono	0.1954 mg
Densidad carbono	2.26 g/ml
Peso resina	0.797 mg
Densidad resina	1.0028 g/ml

Capa	Espesor mm	Angulo grados	Densidad total g/ml	% Fibra	Peso Carbono mg	Volumen total mm <sup>3</sup>	Volumen carbono mm <sup>3</sup>	Modulo Young GPa
1	0.23	90	2.0802	0.8570	51.6	26.6432	22.8319	12.284
2	0.16	45	1.5671	0.4541	18.8	18.5344	8.3186	6.599
3	0.69	-45	1.3584	0.2829	51.1	79.9296	22.6106	5.1541
4	0.17	45	1.7429	0.5887	26.2	19.6928	11.5929	8.0444
5	0.22	90	2.044	0.8282	47.7	25.4848	21.1062	11.705

Densidad media Capa 1 y 5	2.062 g/ml
% medio de fibras Capa 1 y 5	0.8426
Modulo Young medio capa 1 y 5	11.99 GPa

Densidad media Capa 2 y 4	1.655 g/ml
Modulo Young medio capa 2 y 4	7.2809 GPa
% medio de fibras Capa 2 y 4	0.5214

Modulo Young sin fibras	3.4 GPa
-------------------------	---------

Se anexan fotos donde se puede apreciar cada espécimen antes y después de se quemara la resina, además de mostrar cada capa de fibra de carbono separada después de ser pesadas en una bascula electrónica con un factor de error de 0.005 gramos.

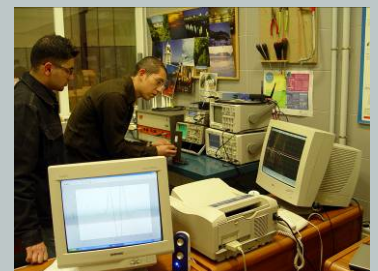
**Generación de daño en especimenes.** Después se hizo la generación de daño por impacto a cada muestra, aplicando diversas fuerzas según la masa de cada impactador, dejándolos en caída libre considerando un rozamiento nulo a una altura constante de 4.018metros.



Muestra A (cara anterior) con daño correspondiente al impactador #1, 2 y 3.



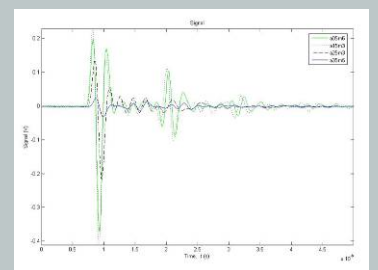
Muestra A (cara posterior) con daño correspondiente al impactador #3, 2 y 1.



Medición de la respuesta del espécimen A.



Muestra A con los transductores.



Respuesta del espécimen A. Mediciones tomadas con 4 niveles de daño.

Impactador	Peso (gramos)	Energía (Joules)
1	17.11	0.674
2	57.85	2.280
3	136.62	5.385
4	463.11	18.254
5	1492.00	58.809

En este cuadro se presenta cada impactador utilizado, indicando sus pesos y energía de impacto respectivos.

Debido a que se detectó un daño significativo con el impactador #3 (energía de 5.385 joules) se decidió no continuar con la aplicación con los otros dos, ya que producirían un daño que llevaría a la ruptura del espécimen, dificultando la medición de ondas a través del osciloscopio; dejando pendiente para una futura profundización del daño aplicado variando la altura de caída y así la fuerza aplicada.

**Mediciones experimentales.** Posteriormente se hizo la medición en el espécimen A; con un Generador de onda y un osciloscopio de la respuesta a la excitación por ondas ultrasónicas de baja frecuencia (5MHz, amplitud de 10mV, un periodo de un ciclo cada 100 $\mu$ s y con un desplazamiento en el origen de 2.5 $\mu$ s en el eje transversal de las capas) en tres zonas de daño hecho con el impactador del 1 al 3, además de tomar la medición en un punto sin daño para su comparación, presentados en gráficos en escala vertical de 400mV y una escala de tiempo de 500 nanosegundos.

De cada una se tomaron 5 mediciones para hacer una comparación interna y medir la variabilidad, que depende de que tan alejada haya sido la medición del centro del daño, la presión con que se hayan sujetado los transductores y que tan acertada haya sido la alineación entre ellos. Mostrando que era necesario poder hacer las mediciones mas precisas y



*Impactadores.*



*Impactador #1 sujeto al electroimán.*



*Disposición del electroimán y el espécimen para la aplicación del daño.*



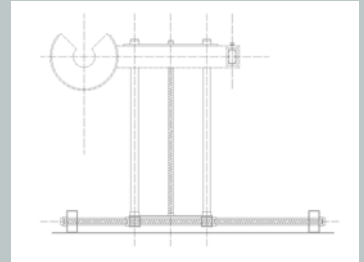
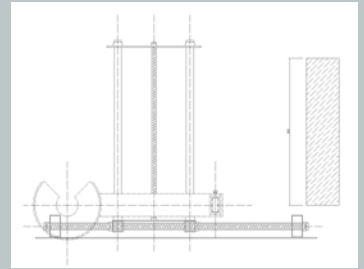
*Muestra A colocada entre dos placas metálicas, para recibir el daño.*



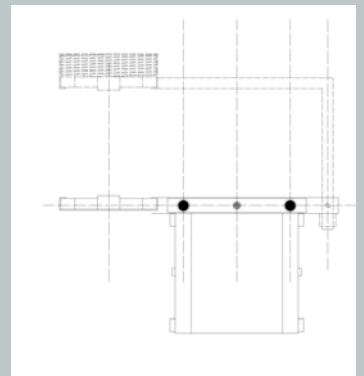
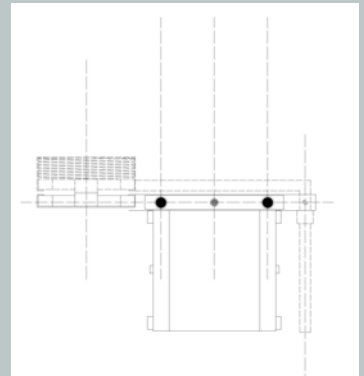
*Daño aplicado en la muestra A con el impactador #3.*

estandarizadas, para así disminuir al máximo los posibles errores que se presentaran en la toma de la respuesta del material.

Además, se hizo el **Diseño de un dispositivo** para la automatización de las mediciones con transductores de diversos niveles de frecuencia, para realizarlas en forma de escaneo a lo largo y alto del espécimen, donde los transductores se mueven en 3 ejes; además de que de esta manera se logra controlar una presión uniforme entre los transductores y la muestra, a la vez que proporciona la obtención de varias mediciones simulando un escáner con el objetivo de introducir un aspecto estadístico en las mediciones.



*Alzado donde se muestra el desplazamiento en el eje Y.*



*Sección que muestra la sujeción para los transductores y desplazamiento en el eje Z.*





# Conclusiones.

La ciencia y tecnología de materiales crea y aplica los conocimientos que permiten relacionar la composición, estructura y el procesado de los materiales con aquellas propiedades que los hacen aptos para cada una de las aplicaciones. Se trata de un área de conocimiento que agrega conocimientos de diversas ciencias y tecnologías que van desde la física y la química hasta las tecnologías de mecanizado y producción.

Los avances que los nuevos materiales han permitido en ámbitos tan dispares como los transportes, las comunicaciones o la medicina ponen de manifiesto el papel crítico que el desarrollo de la ciencia y la tecnología de materiales juega tanto en los sectores industriales como la construcción y servicios, en los que la tecnología y la competitividad son factores clave para el éxito.

No hay que olvidar tampoco las tareas de caracterización de los materiales incluyendo, entre otros aspectos, el análisis de la composición, impurezas, estructura cristalina, defectos y la determinación de sus propiedades (mecánicas, eléctricas, magnéticas, térmicas,...). Cobran especial importancia en este sentido las actividades orientadas a la elaboración y realización de pruebas de certificación y homologación que permitan garantizar la calidad de los materiales y la verificación de las diferentes normativas aplicables, que permitan la homologación internacional de los productos.

Apoyar la creación de una infraestructura de medida y ensayo (pre y post-normativa) de las propiedades de los materiales y sus productos que permita su validación y homologación según los criterios y estándares apropiados. Y aumentar la seguridad y la fiabilidad de los materiales, así como la eficacia y fiabilidad de los procesos y productos industriales para mejorar su comportamiento en servicio.

En general, los composites presentan la gran ventaja principal de su baja densidad con unas muy buenas propiedades mecánicas, permitiendo el diseño de elementos constructivos muy ligeros y una construcción más rápida y fácil. Por el contrario, sus principales inconvenientes son dos: el conservadurismo histórico del sector de la construcción, y el elevado costo económico del material.

Así, se puede afirmar que la aplicabilidad de los composites en la construcción industrial es posible, y que hoy en día, ya es parcialmente favorable respecto a otras soluciones consideradas tradicionales. El punto

débil de esta aplicación es el costo, pero su diferencia con otras soluciones se reduce en el momento en que se tiene en cuenta el ciclo de vida entero de un edificio industrial.

También es importante denotar que con los metales las propiedades de los materiales están principalmente determinados por el proveedor, y que la persona que utiliza los materiales para construir una estructura terminada puede hacer pocos cambios a estas propiedades "de fabrica". Sin embargo, un material compuesto se forma al mismo tiempo que la estructura en sí misma es fabricada. Lo que implica que la persona que está haciendo una estructura está creando las propiedades del material compuesto resultante, y así el proceso de manufactura que se usa tiene una parte crítica en la determinación del rendimiento de la estructura resultante.

La tendencia en los últimos años del mercado de los composites ha sido la de bajar sus precios de venta al aumentar su producción. Ello implica que a corto-medio plazo se prevé que el costo dejará de ser un elemento desventajoso para este tipo de materiales, cobrando mayor importancia precisamente los aspectos ventajosos como son el tiempo, la seguridad y el impacto medioambiental del uso de estos materiales.

Para todo ello, la tecnología usada por los composites debe avanzar para cubrir las necesidades del sector de la construcción. Así se pide al material compuesto más prestaciones y menor costo, se pide al proceso más rapidez y más precisión, pasando todo ello por una normatividad coherente y unificada, una optimización de los moldes utilizados, por automatizar los procesos, por utilizar nuevas fibras y combinaciones, por combinar los materiales compuestos con materiales tradicionales, y por potenciar las matrices reciclables y las fibras naturales.

Los grandes retos de la industria de los plásticos y materiales compuestos es el investigar las propiedades y micro-estructura de un material compuesto, crear una nueva teoría específica de la Resistencia de Materiales, que a su vez implicaría la creación de nuevos métodos de diseño, y lograr automatizar la fabricación de piezas de materiales compuestos y mejoramiento de sus especificaciones y normas de calidad.

Esto se deberá de conseguir a través de la utilización de conocimientos transdisciplinarios, teóricos y experimentales, para caracterizar los nuevos materiales, controlando las propiedades sus propiedades,



correlacionando la estructura microscópica con la macroscópica, sus mecanismos de daño a mediano y largo plazo, a la vez que se evalúan métodos y técnicas de producción de nuevos materiales a nivel industrial.

Desde un punto de vista técnico la necesidad de los códigos y estándares especializados para materiales compuestos se muestra desde la diferencia fundamental de las propiedades mecánicas y físicas en comparación con los materiales convencionales de construcción. El desarrollo de códigos y pautas para el uso de refuerzos con FRP en estructuras de concreto ha sido predominante desde hace décadas, y se espera que continúe así por varios años más. Donde mucha de esta actividad está motivada por la inmediata necesidad de mejores materiales económicos a largo plazo para la reparación y rehabilitación de estructuras obsoletas, degradadas o localizadas en zonas sísmicas.

Sin estos códigos y estándares sería difícil que los materiales compuestos pudieran hacer su incursión mas allá de limitadas investigaciones y proyectos demostrativos. Métodos de pruebas estandarizadas y esquemas de identificación de materiales minimizan las incertidumbres en el desempeño y especificación de los materiales compuestos.

En otros casos, como con las nuevas construcciones, donde la necesidad de nuevos materiales no siempre se enfoca desde un punto de vista a largo plazo, los códigos facilitarían su uso, mostrando eventualmente los beneficios del ciclo de vida de los materiales compuestos. Además de que se expresa una falta de creación y desarrollo de normas en la implementación de cubiertas de puentes y elementos autoportantes resistentes por forma, en los que se muestra una creciente investigación.

Además de que existen varias necesidades técnicas y diversas cuestiones que deben ser solucionadas, como:

- El desarrollo de estándares de diseño y pautas que sirvan de guía para los diseñadores y autoridades pertinentes.
- El diseño eficiente y la caracterización de juntas panel con panel y uniones de los paneles con los largueros.
- Comportamiento a fatiga de paneles y conexiones.
- Caracterización de la durabilidad bajo cargas mecánicas combinadas con ambientales.
- Mecanismos de falla y carga máxima, incluyendo modelos de pandeo local y global.

Una de las exigencias actuales principales para un material compuesto es que trabaje en las tres dimensiones (normalmente sólo lo hace en dos). Para ello se está experimentando en lo que se denomina la arquitectura textil. En función de cómo se dispongan las fibras se puede lograr un trenzado en 3D. Tan solo es cuestión de saber cómo tirar de la fibra y como girar las bobinas.

El objetivo a largo plazo de los estudios sobre la evaluación no destructiva y el daño en los materiales compuestos consiste en desarrollar un marco conceptual que permita predecir de forma adecuada el deterioro microestructural según un estudio de cargas, su evolución, interacción e influencia sobre las propiedades macroestructurales del material. Con lo cual no sólo se podrá prever la esperanza de vida de un elemento estructural, sino que también será posible hacer el diseño del material compuesto para una vida de uso óptima en una aplicación determinada.

Por lo que puedo concluir que esta investigación es significativa debido a que las pruebas realizadas en laboratorio y los datos obtenidos de dichas pruebas dan un referente para demostrar que los materiales compuestos reforzados con fibras (CFRP) pueden ser utilizados con mayor difusión y relevancia que la actualmente se le da, siendo implementados en muchos mas aplicaciones en la industria de la construcción. Lo que hace falta es el conocimiento de los materiales, sus propiedades, y sobre todo normas y estándares que den pautas para un diseño mas amigable de estructuras y sistemas constructivos.

De ahí es donde esta investigación cobra importancia, al dar un paso hacia la estandarización de los materiales compuestos, con la caracterización de los materiales junto con la propuesta de ensayos al impacto, para lograr la creación de una normativa nacional que pueda equipararse a las existentes a nivel internacional.

## Bibliografía.

- A. Turon, J. Costa, D. Trias, J.A. Mayugo, N. Blanco. (2003). *Fatigue life of unidirectional polymer-matrix composites considering a weibull probability distribution for the brittle failure of the fibers*. 14th International Conference on Composite Materials. San Diego, California.
- Abdullah H. Al-Saidy; F. W. Klaiber; y T. J. Wipf. (2004). *Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plate*.
- ACI Committee 440. (1996). State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures. *ACI 440 R-96*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- ACI Committee 440. *State-of-the-art report on fiber reinforced plastic FRP reinforcement for concrete structures*. American Concrete Institute, 1996.
- Andersen, S.I., Lihot, H. y Lystrup, A. (1996). *Properties of composites with long fibers*. Design of Composite Structures Against Fatigue.
- ASM International (1998). *Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM Metals Handbook 9th Ed*, Vol. 17.
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico A. C. Reporte Especial de Grupo TEXNE (Infoplas).
- B. D. Olin, y W. G. Meeker (1996). *Application of Statistical Methods to Nondestructive Evaluation, Technometrics*, Vol. 38, No 2, pp 95-130.
- Bader, M.G. (1993). *Failure micromechanisms in continuous carbon-fiber/epoxy-resin composite*. Composites Science and Technology.
- Cegarra Sánchez José. *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Ed. Diaz de Santos, España, 2004.
- Cusa, Juan de. *Aplicaciones del plástico en la construcción*. Ed. Ceac, Barcelona, 1979.
- D. E. Bray y D. McBride Eds. (1992). *Nondestructive Techniques*, John Wiley and Sons, New York.
- Di Mattia. *Desiging with plastics and composites: A handbook*. New York, 1991.
- Dietz, Albert G. H. *Plásticos para arquitectos y constructores*. Ed. Reverte, España, 1973.
- Gamstedt, E.K. y B.A. Sjogren. (1999). *Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies*. Composites Science and Technology.
- Grimes, G.C. (1977). *Composite materials: Testing and design*. American Society for Testing and Materials.
- Gürdal, Zaref. (1999). *Design and optimization of laminated composite materials*. New York; Wiley.
- Harris, B. (2001). *The fatigue behavior of fiber-reinforced plastics and life prediction*. Materials composites.
- Informe Cotec 2006, *Tecnología e innovación en España*. Capitulo 8 Sector de la construcción.

- Informe del estado General de la ciencia y la tecnología. CONACYT, México, 2006.
- Jeffrey, L. Meikle. *American plastic: A cultural History*. New Brunswick, 1995.
- Joseph, Gordon Jr. *Industrial design of plastic products*. New Jersey, 2003.
- Journal of Composites for Construction. Mayo 2002, pag. 73 – 87.
- Krause, Anneliese. *Introducción al análisis químico de los plásticos*. Madrid, 1970.
- Miraverte Antonio. (2005). *Una nueva fibra de características ideales para el uso en la construcción*. Zaragoza.
- Muccio, Edward. *Plastic part technology*. Ohio, 1991.
- Quarmby, Arthur. *Materiales plásticos y arquitectura experimental*. Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1976.
- R. Halmshaw (1991). *Nondestructive Testing*, 2nd edition, Edward Arnold, London.
- Reifsnider, K.L. (1991). *Damage and damage mechanics*. Fatigue of Composite Materials. Amsterdam.
- Rizcalla, S., Dawood M. y Shahawy M. (2006). *FRP for Transportation and Civil Engineering Infrastructure*. Reality and Vision.
- S. B. Chase (1998). *Developing NDT Technologies for the Next Century, Structural Materials Technology*. an NDT Conference, San Diego, Cal, pp 91-105.
- S. Pagés, J. Costa, J.A. Mayugo y N. Blanco. *Tratamiento de la fatiga en el diseño estructural con materiales compuestos*. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandía. Girona.
- Sun, C.T., Zhou, S.G. (1988). *Failure of Quasi-Isotropic Composite Laminates with Free Edges*. Journal of Reinforced Plastics and Composites.
- UK Polymer Composites Sector. (2001). *Foresight Study and Competitive Analysis*.
- Verb Matters, OMA. *Investigación sobre materiales*. Ed. Actar, Barcelona, 2004.
- Vinson, J. R. (1999). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*, Technomic, Lancaster.