

Capítulo 1

Introducción

1.1. Generalidades

Es notable el aumento del uso de materiales compuestos avanzados en la fabricación de elementos estructurales en los últimos años. Así pues, los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio van cediendo ciertas aplicaciones a materiales compuestos avanzados, llamados composites, con los que se consiguen mejores propiedades específicas. En particular, los materiales compuestos de matriz polimérica, como por ejemplo los polímeros reforzados con fibras de vidrio o con fibras de carbono, presentan unas excelentes relaciones rigidez/peso y resistencia/peso que los hace idóneos para determinados sectores productivos.

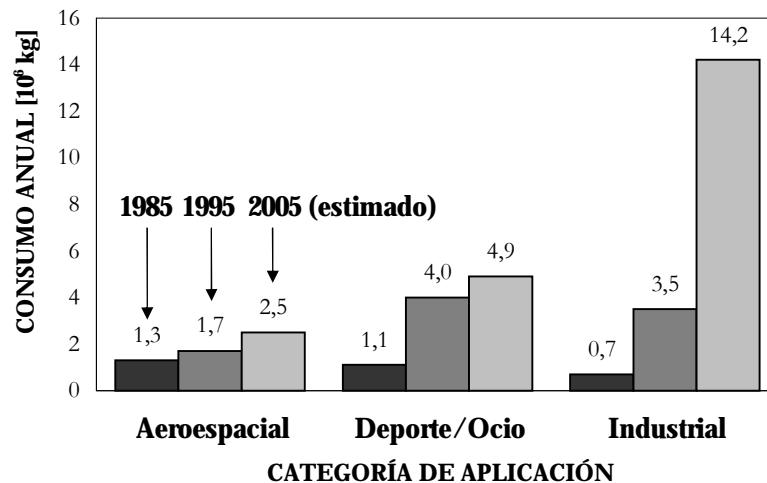


Figura 1-1. Aplicación de los composites de fibra de carbono en el periodo 1985-2005. Crecimiento en las últimas décadas en los distintos sectores. El mayor crecimiento se prevé en las aplicaciones industriales (datos adaptados de *Toray Industries* de Tokio, 1999)

Estas nuevas soluciones inicialmente se aplicaron de forma exclusiva en industrias tecnológicamente punteras como la aeronáutica o la aeroespacial. Asimismo, el avance tecnológico y la disminución de costes de producción han provocado que cada día su

utilización se generalice más a todo tipo de productos. Los materiales compuestos han entrado con fuerza dentro de muchas aplicaciones como por ejemplo en la industria del automóvil, en la fabricación de pequeños barcos, como material base de conducciones y contenedores de fluidos, en los objetos deportivos, en la rehabilitación de edificios, etc. En la figura 1-1 se muestra la evolución en las últimas décadas del uso de los composites con fibra de carbono donde se observa un importante crecimiento en aplicaciones industriales.

Las características especiales que tiene el proceso de diseño estructural de piezas en materiales compuestos es un factor adicional que ha limitado su generalización. El diseño de un nuevo elemento de material compuesto no sólo pasa por idear la geometría del elemento, también requiere diseñar la configuración del propio material. Tradicionalmente se realizaba esta tarea con métodos basados en parte en datos empíricos dado que el conocimiento teórico del comportamiento de este tipo de materiales era reducido. Sin embargo, dado que las posibilidades de obtener composites distintos son prácticamente ilimitadas, la caracterización con ensayos sobre el propio material es muy costosa y difícilmente generalizable o extrapolable a otras configuraciones. Por lo tanto, esta dependencia de la experimentación frenó, en parte, la extensión en el uso de los compuestos en aplicaciones más corrientes hasta que se ha ido estableciendo mejor su conocimiento teórico. El uso de modelos matemáticos para predecir su comportamiento y la simulación de estos mediante métodos numéricos parece ser el buen camino para lograr avanzar en este conocimiento y parece el paso necesario para conseguir herramientas de ayuda en este complicado proceso de diseño y optimización del material.

Sin embargo, se observa aún en la mayoría de investigaciones donde se intenta modelar los composites utilizando técnicas de simulación numérica que actualmente no es fácil asegurar la correcta correlación entre los análisis teóricos y los resultados experimentales. Más difícil es obtener una buena predicción del comportamiento mecánico cuando éste está sometido a niveles de tensión fuera de la zona lineal elástica o durante largos periodos de tiempo (cuando se entra a estudiar fenómenos como el de la fatiga, la termofluencia, etc.)

1.2. Materiales compuestos. Plásticos reforzados con fibras

Se conoce como materiales compuestos a aquellos que son una combinación de dos o más materiales (conocidas como sustancias componentes, constituyentes o fases) que se diferencian en función, forma o composición a escala macroscópica. Las fases mantienen sus identidades, es decir, no se disuelven o se mezclan completamente. Normalmente las fases pueden ser distinguidas físicamente y es posible identificar la interfase entre una y la otra. Asimismo, si los materiales compuestos son usados por sus peculiares propiedades estructurales, la definición de materiales compuestos se puede restringir a aquellos en los

que una sustancia componente es el refuerzo (conocido por fibra o partícula) soportado por la otra fase que actúa como material aglutinante (conocido como matriz).

La combinación de diferentes matrices (normalmente se usan polímeros o metales ligeros) con distintos materiales o disposiciones de fibra (fibra de vidrio, de carbono, orgánicas o de polímeros, entre otras) permite conseguir materiales con propiedades mecánicas muy especiales que se adaptan a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño. Existe pues una gran cantidad de combinaciones posibles y, por lo tanto, muchos tipos de compuestos. Se pueden distinguir en función de su tipología (fibras cortas o largas, continuas o discontinuas, orientadas o con disposición aleatoria, una sola capa o laminados multicapa, etc.), o bien en función del tipo de sustancias componentes.

La tabla 1-1 muestra una clasificación de los diferentes tipos de compuestos según los distintos tipos de refuerzo. Normalmente estos compuestos se presentan en forma de laminados unidireccionales (todo el refuerzo en una misma dirección) o en laminados bidimensionales (láminas apiladas con el refuerzo en distintas orientaciones).

	Fibra orientada unidireccional
Fibra larga y continua	Fibra orientada bidimensionales (tejido, <i>mat</i> cosido)
	Fibra orientada tridimensional (tejido 3-D, cosido 3-D)
	Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo continuo)
Fibra discontinua	Orientación aleatoria (<i>mat</i> de hilo troceado)
	Orientación predominante
Partículas y <i>whiskers</i>	Orientación aleatoria
	Orientación predominante

Tabla 1-1. Breve clasificación de los compuestos de matriz polimérica según la disposición y el tipo de refuerzo (Barbero, 1998)

En las aplicaciones que se estudian en el presente trabajo el material compuesto utilizado es uno de los más típicos en aplicaciones industriales: laminado multicapa constituido por una matriz de polímero reforzado con fibras largas (FRP, *fibre reinforced polymer*). Los FRP se suelen utilizar en forma de laminados, es decir, como apilamientos de láminas cada una de las cuales contiene fibras de refuerzo en direcciones bien determinadas. Existen otras posibilidades, como los laminados cosidos, en los cuales las capas de refuerzo se cosen entre sí antes de impregnarlas con la matriz, o los compuestos reforzados con tejidos tridimensionales, cuyos modos de daño se alejan de lo que se describe en este trabajo.

Estos tejidos tridimensionales, de aplicación relativamente reciente, vienen a solventar uno de los principales inconvenientes de los laminados clásicos como es la debilidad en las interfases entre láminas en términos de rigidez y resistencia.

En aplicaciones industriales los FRP más comunes son los de matriz termoestable reforzada con fibras cerámicas largas orientadas (a veces entrelazadas en forma de tejido o bien cosidas). Estos son materiales que dan una muy buena relación entre su facilidad de producción, su coste y sus propiedades mecánicas específicas. Las matrices más comunes son las de resina de epoxy o de poliéster, en cuanto a las fibras suelen ser de vidrio, que dan lugar a los GFRP (*glass fibre reinforced polymer*), o bien de carbono, que dan lugar a los CFRP (*carbon fibre reinforced polymer*).

Las características estructurales más valoradas en los polímeros reforzados con fibra larga son sus elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia. Tal como se muestra de forma comparativa en la figura 1-2, con los metales comúnmente utilizados en piezas estructurales (acero y aluminio) no se logran los mismos valores de rigidez y resistencia por unidad de masa que con los FRP. Por otra parte, otra característica que hace interesantes a los FRP es que pueden presentar una resistencia a la fatiga excepcional.

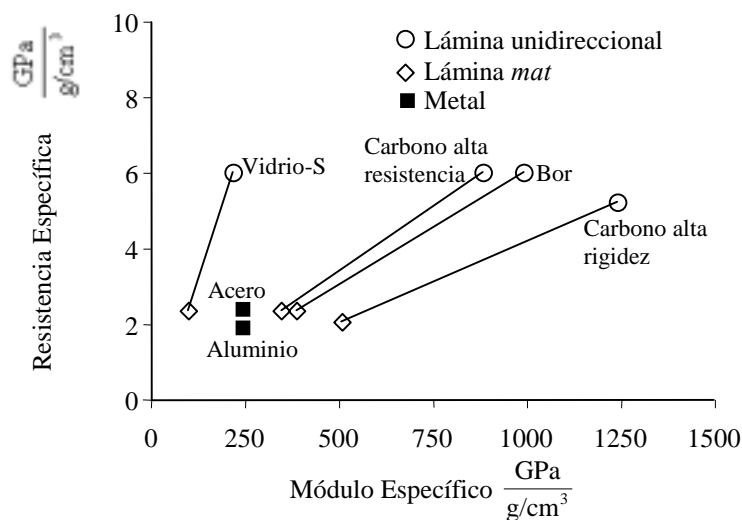


Figura 1-2. Rigidez específica vs. Resistencia específica. Comparación cualitativa entre compuestos de matriz polimérica y metales. (Barbero, 1998)

Las propiedades estructurales efectivas (o globales) que se obtienen en un material compuesto son la adición de contribuciones de sus distintas sustancias componentes y de su configuración. De forma que las propiedades mecánicas del compuesto final dependen en parte tanto de las propias propiedades de los constituyentes como de la disposición

geométrica de éstos. A continuación se presentan las propiedades de las sustancias más comunes usadas en FRP como fibras de refuerzo y como matriz.

(a) *Propiedades de los constituyentes: fibra y matriz*

Las fibras son las responsables de las buenas propiedades estructurales del composite. Sobretodo logran que el material compuesto tenga unas elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal. Las principales fibras que se utilizan en plásticos reforzados son de naturaleza cerámica: las de vidrio, las de carbono y las de boro; también se usan comúnmente algunas fibras de naturaleza orgánica como las de aramida. En la tabla 1-2 se muestran las propiedades elásticas y de resistencia estática de fibras usadas en polímeros reforzados.

Material	Densidad	Módulo elástico	Resistencia tracción	Alarga- miento	Coef. Poisson	Módulo específico	Resist. específica
	ρ , [g/cm ³]	E , [GPa]	S_t , [MPa]	[%]	ν	$[E/\rho]$	$[S_t/\rho]$
<i>Fibra vidrio</i>							
E-Glass	2,54	72,4	3450	4,8	0,20	28,5	1,36
S- Glass	2,49	86,9	4300	5,0	0,22	34,9	1,73
<i>Fibra carbono</i>							
AS-1 (*)	1,80	228,0	3100	1,32	—	126,7	1,72
AS-4 (*)	1,80	248,0	4070	1,65	0,20	137,8	2,26
IM-7 (*)	1,78	301,0	5310	1,81	0,20	169,1	2,98
P-100 (‡)	2,15	758,0	2410	0,32	0,20	352,5	1,12
T-40 (‡)	1,81	290,0	5650	1,80	—	160,2	3,12
T-300 (‡)	1,76	231,0	3650	1,40	0,20	131,3	2,07
<i>Fibra boro</i>	2,70	393,0	3100	0,8	0,20	145,6	1,15
<i>Fibra aramida</i>							
Kevlar 49 (†)	1,45	131,0	3620	2,8	0,35	90,3	2,50
Kevlar 149(†)	1,47	179,0	3450	1,9	—	121,8	2,35

Tabla 1-2. Propiedades mecánicas de las fibras más comunes en FRP. (*) Producto comercial de Hercules. (‡) Producto comercial de Amoco. (†) Producto comercial de Du Pont. (Reifsnider-Case, 2002)

Las fibras de vidrio tienen una rigidez específica no superior a la de los metales tradicionales, pero tienen amplia aceptación debido a su alta resistencia específica y a su bajo coste. Las fibras de carbono presentan a la vez unas excepcionales propiedades de rigidez y resistencia, lo que las hace ideales para ciertas aplicaciones. Sus propiedades mecánicas varían mucho en función de su proceso de producción. Se pueden distinguir dependiendo de sus características dos tipos: las fibras de carbono de alta resistencia (por ejemplo las T-300 de la empresa Amoco) y las fibras de carbono de alta rigidez (por ejemplo las P-100 de la empresa Amoco). Las fibras de boro, que tienen aplicaciones muy excepcionales, son monofilamentos cerámicos relativamente gruesos con una baja flexibilidad. Presentan unas elevadas rigidez y resistencia específica pero una gran fragilidad. Las fibras de aramida tienen una elevada flexibilidad mostrando muy buenas propiedades de resistencia específica y de resistencia al impacto. En cambio, no presentan propiedades de rigidez excepcionales.

La matriz es el material aglutinante que permite a las fibras trabajar de forma conjunta transmitiendo los esfuerzos de unas a otras. Las matrices de polímero tienen como principales limitaciones la pérdida de propiedades a alta temperatura, su susceptibilidad medioambiental (son afectadas por la humedad, las radiaciones, etc.) y la baja resistencia a cortante. Las matrices poliméricas pueden ser divididas en dos grupos: las termoplásticas y las termoestables. Las termoplásticas se reblandecen con la aplicación de calor y pueden ser remodeladas con una temperatura y presión adecuada. Aunque su proceso de producción limita su uso en composites de fibras largas, son especialmente indicadas para ser utilizadas en aplicaciones donde es necesario mucho volumen con bajo coste. Los polímeros termoplásticos utilizados en compuestos incluyen entre otros el polipropileno (PP), las aramidas (Nylon), poliuretano (PU) y el poli-eter-eter-ketone (PEEK). Normalmente el rango de temperatura que permite su uso no supera los 225 °C. En cuanto a los termoestables, polimerizan (proceso de curado) en el mismo momento de la fabricación y no se reblandecen con el calor. Su estado líquido antes del curado los hace idóneos para la producción de laminados con fibras largas. Los termoestables más usados como matriz son el poliéster, el *epoxy* y las poliamidas. El poliéster se usa principalmente con fibras de vidrio y permite aplicaciones hasta los 100 °C. Los *epoxies* resultan más caros pero tienen mejor resistencia a la humedad, menos variaciones dimensionales durante el curado y pueden aguantar temperaturas de uso de hasta 175 °C. La poliamida permite aplicaciones en temperaturas elevadas (hasta 300 °C) pero requiere de un proceso de producción más complicado.

En la tabla 1-3 se muestran las propiedades elásticas y de resistencia estática de algunas matrices típicas usadas en polímeros reforzados.

Material	Densidad	Módulo elástico	Resistencia tracción	Alarga- miento	Coef. Poisson	Módulo específico	Resist. específica
	ρ , [g/cm ³]	E , [GPa]	S_r [MPa]	[%]	ν	$[E/\rho]$	$[S_r/\rho]$
<i>Termoplásticos</i>							
PEEK (*)	1,30 – 1,32	3,24	100,0	50	0.4	2,5	76,3
PPS (‡)	1,36	3,3	82,7	4	—	2,4	60,8
<i>Termoestables</i>							
Poliéster	1,1 – 1,4	2,1 – 3,4	34,5 – 103,5	1 – 5	—	2,2	55,2
Epoxy	1,38	4,6	58,6	—	0,36	5,5	74,0
Poliamida	1.46	3,5	103,0	—	0,35	2,4	70,5

Tabla 1-3. Propiedades mecánicas de las matrices más comunes en FRP. (*) Victrex, producto comercial de ICI. (‡) Ryton, producto comercial de Phillips Petroleum. (Reifsnider-Case, 2002)

(b) Propiedades de algunos polímeros reforzados con fibras largas

Las propiedades que se pueden obtener con un polímero reforzado dependen tanto de las propiedades de sus constituyentes como de la proporción volumétrica entre ellos y de su disposición geométrica. En los laminados con fibras largas la fase de refuerzo suele estar alineada obteniéndose sólidos altamente anisótropos dado que muestran distintas propiedades en distintas direcciones.

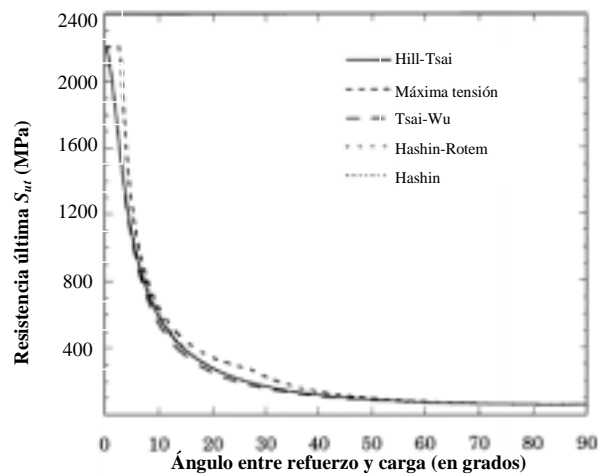


Figura 1-3. Propiedades de resistencia a tracción los laminados UD en función de su dirección (0° dirección del refuerzo y 90° dirección perpendicular al refuerzo según algunos de los criterios de fallo formulados para laminados UD (puede verse la formulación de estos criterios en el Apéndice D)

Las propiedades de los laminados están limitadas por las propiedades ortótropas de las láminas unidireccionales (UD). En los laminados UD se consiguen los valores extremos de rigidez y resistencia para una matriz y fibra concreta en una determinada proporción volumétrica. La dirección del refuerzo (conocida como dirección 1 ó a 0°) exhibe los valores máximos y la perpendicular a ella (conocida como dirección 2 ó a 90°) los valores mínimos (figura 1-3).

En la tabla 1-4 se muestran a modo de ejemplo las propiedades efectivas de algunos laminados UD con matriz de epoxy. En la tabla se pueden comparar las características de rigidez y resistencia. Los valores máximos y mínimos se consiguen en la dirección del refuerzo (dirección 1) y en la dirección perpendicular al refuerzo (dirección 2) respectivamente.

Material	Densidad	Módulo elástico	Resistencia tracción	Coef. Poisson	Módulo específico	Resist. específica
	ρ , [g/cm ³]	E_1/E_2 [Gpa]	S_{11}/S_{22} [MPa]	ν	$[E_1/\rho]$	$[S_{11}/\rho]$
E glass-epoxy	1,80	39 / 4,8	1130 / 96	0,30	21,6	627,7
S glass-epoxy	1,82	43 / -	1214 / 758	-	-	-
AS - epoxy	1,54	127 / 9,0	1447 / 62	0,25	82,3	939,6
T-300-epoxy	1,55	138 / 10	1447 / 44	0,21	-	-
Boro-epoxy	1,99	207 / 19	1585 / 62	0,21	-	-
Kevlar49-epo	1,38	76 / 5,5	1379 / 28	0,34	-	-

Tabla 1-4. Propiedades mecánicas de las laminados UD con matriz de epoxy (Reifsnider-Case, 2002)

1.3. Diseño estructural de elementos laminados

El diseño de piezas de materiales compuestos es considerablemente más complejo que el diseño de piezas de materiales tradicionales. No sólo se debe idear la geometría del elemento sino también diseñar el propio material. Históricamente, al principio del uso de los materiales compuestos, la secuencia de apilado se limitaba a configuraciones cuasi-isotrópicas, con propiedades parecidas en cualquier dirección de la lámina, como por ejemplo con secuencias del tipo $[\pm 45, 0, 90]_s$ (laminado simétrico formado por una lámina a $\pm 45^\circ$, una a 0° , dos a 90° , una a 0° y una a $\pm 45^\circ$). Esto simplificaba el proceso de diseño, ya que gracias a este comportamiento isotrópico el compuesto equivalía a un material tradicional de bajo peso. No obstante, estos laminados desaprovechaban la posibilidad de

los materiales compuestos para obtener mejores propiedades en las direcciones más solicitadas. Es decir, diseñar las propiedades de material a través de la elección del número y orientación de las láminas que forman el laminado con la finalidad de obtener una rigidez y resistencia que cumpla con los requisitos deseados a medida de la aplicación (Gürdal *et al.* 1999).

Por lo tanto, en el diseño de una pieza de material compuesto es habitual diseñar la geometría de la pieza y la configuración de los componentes, de forma que se aprovechen mejor las cualidades de este tipo de materiales, reforzando las direcciones con mayor nivel de esfuerzo. Así, se debe empezar por definir cada uno de los materiales componentes, la orientación del refuerzo en cada lámina u orientaciones del tejido, el espesor de cada una de las láminas (que básicamente dependerá del peso específico del refuerzo o tejido utilizado) y, finalmente, la secuencia de apilado óptima de éstas. Es bien conocido que la secuencia de apilado de las láminas juega un papel crucial en el comportamiento final del laminado. Por ejemplo, si se considera un laminado formado por láminas del mismo material, con dos láminas orientadas a 0° respecto a la dirección de la carga y una a 90° , con una distribución simétrica, es decir $[0_2,90]_s$, la rigidez en el plano de la lámina es la misma que la de su distribución inversa, $[90,0_2]_s$, sin embargo, las propiedades a flexión de cada configuración son bien distintas.

Otro aspecto importante durante el diseño es comprobar el grado de compatibilidad del refuerzo con el método de producción y la geometría del componente. Los tejidos de refuerzo deben ser seleccionados considerando su aptitud a acomodarse a las curvaturas de la geometría del componente (*drapeability*). También es fundamental que los refuerzos o tejidos permitan un buen compactado durante la fase de manipulación en seco, asegurando una correcta orientación de la fibra.

A pesar de las cualidades de los materiales compuestos, en cuanto a reducción de peso y diseño de propiedades, el coste unitario de este tipo de materiales continúa siendo el principal inconveniente para una mayor utilización. El principal responsable de este elevado coste es el estado actual de la tecnología de fabricación y de laminado de este tipo de materiales. Asimismo, es muy importante la correcta elección del proceso de fabricación empleado, a fin de garantizar una buena calidad final del elemento.

Así, el proceso de diseño (esquemático en la figura 1-4) requiere de un primer paso de definición del problema y de las especificaciones que deberá cumplir el elemento a diseñar. A partir de esta información se genera una serie de soluciones mediante un proceso de síntesis apoyado básicamente por la experiencia y conocimientos del diseñador. Las posibles soluciones viables se analizan posteriormente para comprobar su efectividad. Todo este proceso no es lineal, más bien se trata de una tarea iterativa que permite ir mejorando la solución propuesta hasta llegar al diseño final (Barbero, 1998).

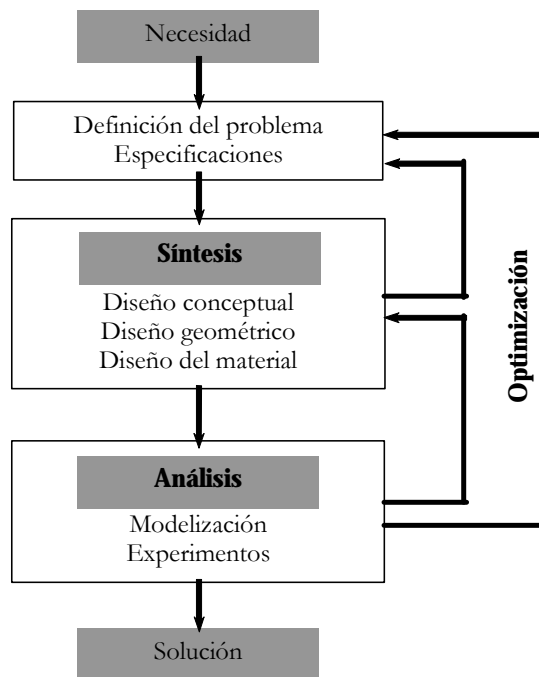


Figura 1-4. Esquemización de las etapas del proceso de diseño.

Tradicionalmente se ha realizado esta labor, tanto la *síntesis* como la *evaluación*, con métodos basados en el conocimiento empírico. Además, como el número de combinaciones posibles de compuestos es prácticamente ilimitado, la caracterización mediante experimentación se hace muy costosa por no decir imposible. La dependencia de la experimentación frena la generalización del uso de los compuestos en aplicaciones más corrientes. Actualmente el uso de modelos matemáticos y métodos numéricos para predecir y simular su comportamiento parece ser un buen camino para el *análisis*, y el paso necesario para conseguir una buena herramienta de ayuda en este complicado proceso de diseño.

1.3.1. Distintos enfoques para el análisis de laminados

Por lo tanto, uno de los primeros pasos es conocer el comportamiento del propio compuesto ya que se trata de un material altamente heterogéneo. Una de las dificultades en su análisis es la determinación de las propiedades globales, también llamadas efectivas (módulos elásticos o de rigidez, estados límites de resistencia, etc.) a partir de las propiedades de sus constituyentes. Toda esta problemática se complica aun más en los compuestos laminados con fibras largas orientadas. A causa, principalmente, de la elevada anisotropía de cada lámina y del laminado resultante, y a la existencia de efectos de acoplamiento en las deformaciones (por ejemplo, el acoplamiento tracción – cortante).

En la actualidad existen distintas alternativas para modelar el comportamiento mecánico de los materiales compuestos. Por un lado existen los llamados *macromodelos* (o modelos *macromecánicos*) donde se considera el estudio del compuesto a partir de propiedades efectivas. De este modo es posible estudiar el comportamiento global del compuesto a través de un material homogéneo equivalente, eso sí, teniendo en cuenta que en realidad se trata de un material heterogéneo a pequeña escala. Por otro lado, en el extremo opuesto existen las aproximaciones a través de *micromodelos* (o modelos *micromecánicos*) donde se consideran los mecanismos microestructurales que se establecen entre los diferentes constituyentes que forman el compuesto. Para ello es necesario conocer su disposición y distribución exacta y la interacción que aparece entre ellos. Dado que el estudio a esta escala de un sólido requiere tener en cuenta la disposición de cada una de las fibras y de cada espacio que ocupa la matriz resulta ser un enfoque impracticable para los polímeros compuestos laminados y, en cualquier caso, la complejidad y el tamaño del modelo necesario para ello haría que el coste computacional fuese demasiado grande. Estos modelos solamente se han utilizado para estudiar fenómenos muy locales de interacción entre los constituyentes.

Por otro lado, la aproximación macromecánica necesita de un proceso de homogeneización. Es decir, de una formulación que permita obtener las propiedades efectivas del compuesto para poder tratar su comportamiento como si fuera homogéneo. Muchos de los modelos macromecánicos están basados en la *teoría de mezclas* para calcular las propiedades efectivas de los compuestos. Las hipótesis básicas de la *teoría de mezclas clásica* son las siguientes: (i) las propiedades mecánicas del compuesto resultan de la participación de cada uno de sus componentes según su fracción volumétrica, (ii) en un volumen infinitesimal participa una cantidad finita de sustancias componentes, (iii) cada sustancia participa en la misma proporción a escala micro y macroscópica, y (iv) la deformación es la misma para cada componente.

Tradicionalmente, la simulación del comportamiento elástico de laminados se ha llevado a término mediante lo que se conoce como *teoría de laminados*. De hecho a este tipo de enfoque se le puede considerar un modelo cuasi-macromecánico donde se analiza el comportamiento del laminado suponiendo cada lámina como un sólido de características mecánicas homogéneas, generalmente anisótropas. 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 bien a partir de ensayos experimentales con probetas sencillas. Las propiedades del laminado resultan de la combinación de las propiedades de cada lámina a través de la *teoría de laminados*. Esta teoría impone compatibilidad cinemática entre todas las láminas teniendo en cuenta su posición en el laminado y su grosor. Cualquier deformación del laminado se desglosa en una deformación plana más una deformación de curvatura, asumiendo que el laminado es suficientemente

delgado para que el radio de curvatura sea el mismo para todas sus láminas. La teoría de laminados proporciona, en general, buenos resultados en el campo elástico y para esfuerzos de tracción siempre y cuando, eso sí, el laminado sea lo suficientemente esbelto. Muchos de estos modelos constitutivos suelen determinar las propiedades de los laminados a partir de características como la orientación y la distribución de las distintas capa unidireccionales de fibra que contienen. En la literatura se pueden distinguir diferentes tipos de aproximaciones analíticas: (1) *modelos elástico-lineales para laminados planos*, (2) *modelos para barras laminadas rectas y curvas* y (3) *modelos para placas laminadas o teoría de laminados*.

Analizando las láminas como un material homogéneo se pierde toda referencia de los constituyentes y sólo es posible recoger los fenómenos de degradación a partir de un enfoque fenomenológico ya que se manejan las características efectivas del material. Aunque las aproximaciones anteriores son muy útiles para el diseño, es difícil abordar con ellas estudios del comportamiento más allá del límite elástico o para tiempos largos (fatiga, termofluencia, degradación química, etc.). Las propiedades específicas del compuesto (rigidez, resistencia residual, etc.) se van modificando por el daño progresivo que van adquiriendo los constituyentes durante su servicio por la aparición de distintos sucesos, ya sea en forma de desunión fibra-matriz, rotura de fibras de refuerzo u otros mecanismos como 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 cada una de las 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 de material el comportamiento de sus materiales constituyentes, cada uno con su propio modelo constitutivo (Car, 1999 y 2000). Algunos autores a este tipo de aproximaciones los han denominado *mesomodelos*.

Otra alternativa es el uso de *teorías de doble escala*, también conocidas como *teorías de homogeneización*, en ellas 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_b , tal como se presenta en la figura 1-5, y una *escala local* representada por Y_b , donde se analiza la estructura interna del compuesto a través de *un volumen representativo* del medio heterogéneo. La escala local permite obtener un comportamiento efectivo que permite tratar la escala global como si fuera un material homogéneo.

Bajo estos conceptos pueden encontrarse diferentes formulaciones: el *método de promedios*, la *teoría de expansión asintótica*, etc. (Zalamea *et al.* 2002). Con este método sólo es posible modelar materiales con un dominio estadísticamente homogéneo que permita determinar este volumen elemental representativo. Es decir, el método es aplicable a materiales donde exista una distribución de refuerzo homogénea o periódica. Aunque esta metodología

permite reproducir adecuadamente los fenómenos de interacción matriz-fibra, el cálculo a doble escala implica un mayor costo computacional que los llamados macromodelos.

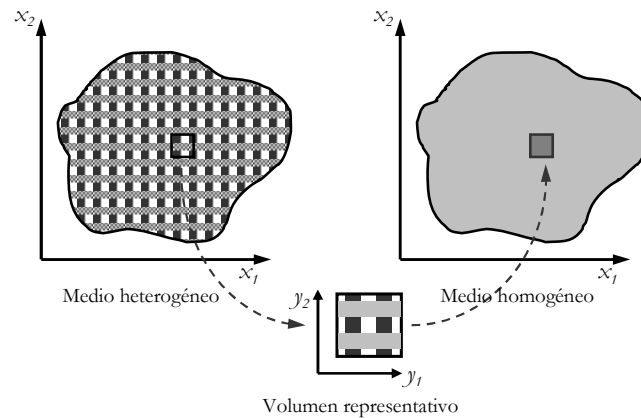


Figura 1-5. Esquema de la teoría de homogenización; utilización de dos escalas.

1.3.2. Análisis de compuestos por el método de los elementos finitos

Los métodos que proporcionan una solución analítica al análisis de compuestos (o de elementos estructurales de material compuesto) sólo son aplicables a casos de poca complejidad geométrica con un comportamiento elástico lineal. Por lo tanto, se hace imprescindible disponer de herramientas de simulación numérica que permitan abordar la resolución de cualquier modelo matemático que describa el comportamiento de un material compuesto. Actualmente el método numérico más empleado en análisis estructural es el de los elementos finitos (FEM). Así pues, se pueden clasificar las teorías más empleadas en este contexto según los siguientes apartados

(a) Teorías de elementos de sólidos planos o espaciales

Con esta teoría el laminado se tiene que modelar a través de un elemento continuo bi o tridimensional. Se puede utilizar un gran número de elementos (como mínimo uno por capa) para modelar un laminado, o bien utilizar elementos con sublaminados donde se aplica una teoría de capa única que requiere un coste computacional mucho menor. Aun así esta teoría no es aplicable en la mayoría de elementos estructurales de polímeros reforzados. 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 enormes errores numéricos.

(b) *Teorías de capa única equivalente*

En esta teoría el laminado se representa por un elemento de capa única equivalente con las propiedades anisótropas específicas. Se basa en forzar un campo de desplazamiento continuo a través del grosor del laminado. Esta teoría requiere muy poco coste computacional aunque no permite obtener cierto tipo de resultados como, por ejemplo, las tensiones cortantes entre láminas.

(c) *Teorías de aproximación bidimensional por capas*

Éstas superan las limitaciones de la teoría de capa única que crea discontinuidades en capas de diferentes materiales compuestos. Existen formulaciones de elemento finito como sólido degenerado al plano y como placa bidimensional.

En general, se puede observar en la literatura una fuerte ausencia de herramientas de simulación numérica para realizar análisis no lineales del comportamiento de los materiales compuestos. En la mayoría de trabajos se intenta realizar una correlación entre los resultados analíticos y los experimentales, que, en gran medida, no posibilitan una solución suficientemente amplia. Además, la imposibilidad de simular el comportamiento de las no linealidades en materiales fuertemente anisótropos, como lo suelen ser los compuestos, es el principal problema de los códigos de elementos finitos convencionales.

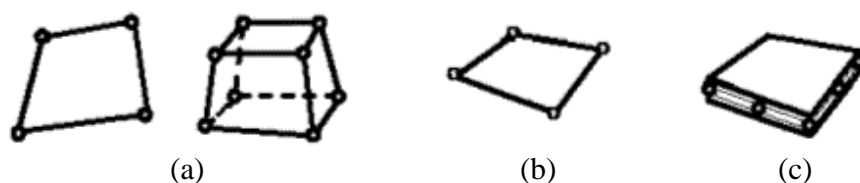


Figura 1-6. Tipos de elementos: (a) sólido plano y espacial, (b) de capa única y (c) capas bidimensionales

1.4. Motivación y objetivo de la tesis

Muchos de los componentes estructurales en servicio, también los elementos fabricados con materiales compuestos, están sujetos a historias de carga que varían en el tiempo en forma cíclica. Esto provoca un proceso de deterioro progresivo de sus propiedades mecánicas. En consecuencia, las cargas con valores variables a lo largo del tiempo provocan fatiga sobre las piezas en servicio, lo que produce el fallo a valores de tensión inferiores a los fallos producidos en cargas constantes o estáticas. La reducción de la resistencia y el posterior fallo del material sometido a cargas repetidas se conoce como *fatiga del material*.

La fatiga es actualmente una de las principales causas de fallo. En la literatura se apunta que entre el 50 y el 90% de los fallos de elementos en servicio se debe a este fenómeno. Esto

hace que no sea extraño que la degradación de los materiales sometidos a cargas cíclicas ocupe la atención y los recursos de un gran número de investigadores en los últimos años. Por lo tanto, estimar la esperanza de vida del elemento estructural debe ser uno de los pasos clave en su diseño. De este modo se hace preciso elaborar herramientas conceptuales que permitan esta estimación de vida y así perfeccionar los métodos de diseño que, tradicionalmente, obedecen a criterios exclusivamente estáticos. Aunque los laminados de composite suelen tener mejor comportamiento a fatiga que los metales, el estudio del problema de la fatiga en ellos sigue siendo trascendental. Hay que tener en cuenta que los sectores industriales donde los compuestos resultan ser más idóneos, son los más exigentes en cuanto a requerimientos de fiabilidad. La problemática de la predicción de la esperanza de vida en compuestos ha sido abordada desde el inicio del uso de estos materiales. Primero lo fue a través de una aproximación básicamente fenomenológica y más recientemente, se ha iniciado la investigación de los procesos microestructurales que conducen a la degradación del compuesto para lograr construir modelos menos dependientes de la experimentación. Aun así todavía no existen herramientas que permitan implementar estos desarrollos (empíricos o analíticos) para analizar el comportamiento del compuesto en condiciones de servicio y estimar la degradación de sus propiedades estructurales a lo largo de su tiempo de vida.

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de una herramienta de simulación que permita estimar el tiempo de vida de los laminados de matriz polimérica en condiciones de servicio. Esto debe permitir la caracterización del comportamiento del compuesto, la previsión de su degradación estructural y de su fallo. Para ello se ha formulado un modelo constitutivo en el contexto de la mecánica del medio continuo. Se trata de un *mesomodelo* donde es posible reflejar independientemente el comportamiento de cada una de las fases y tratar independientemente fenómenos de degradación a nivel local, como la rotura de la fibra, el agrietamiento de la matriz, el deslizamiento entre la fibra y la matriz, etc. Mediante una *teoría de mezclas* generalizada es posible compatibilizar los diversos modelos constitutivos de cada una de las fases y obtener el comportamiento efectivo del laminado. El modelo constitutivo se ha implementado en una herramienta de análisis numérico mediante el método de los elementos finitos.

Para abordar la estimación del tiempo de vida bajo cargas fluctuantes a elevados números de ciclos (del orden de 10^6 – 10^7 ciclos) ha sido necesario desarrollar un sistema de linealización de la aplicación de las cargas compatible con el modelo constitutivo del compuesto. Por otro lado, para permitir el análisis bajo cargas cíclicas de características variables se ha desarrollado un sistema de acumulación de la degradación a fatiga sensible al cambio de estas características.

1.5. Contenido de la tesis

En este trabajo se presenta principalmente un modelo constitutivo implementado en el método numérico de los elementos finitos que permite el tratamiento del fenómeno de la fatiga en los materiales compuestos laminados. El documento está organizado en siete capítulos donde se presenta la problemática de la fatiga en laminados compuestos, el modelo constitutivo desarrollado y unos ejemplos de aplicación. En los apéndices que acompañan al documento se exponen aspectos adicionales para complementar su comprensión.

En el capítulo 2 se da una visión de los fenómenos de degradación que tienen lugar en un elemento estructural de material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras debido a la acción continuada de cargas cíclicas, y que resultan en un deterioro irreversible de las propiedades del material (su rigidez y su resistencia residual) y, finalmente, en su fallo. Se describen de forma cualitativa los distintos modos de daño en compuestos, su interacción y su propagación y se relacionan de manera comprensible con los diagramas de vida a fatiga de los materiales compuestos. En este capítulo también se muestra una visión clásica del análisis del fenómeno de la fatiga con un seguimiento de las propiedades efectivas del compuesto mediante las curvas en el plano S-N, curvas de degradación de la resistencia residual y de disminución de la rigidez. A partir de estas herramientas es posible interpretar cómo afectan al comportamiento global de un laminado factores tan diversos como la disposición y propiedades de sus constituyentes o las características de las cargas variables aplicadas.

En el capítulo 3 se abordan las estrategias más comunes para la predicción del tiempo de vida de un material sometido a cargas de fatiga. Se presentan, con sus limitaciones de aplicación, las distintas metodologías de modelización de los compuestos que han realizado numerosos investigadores en los últimos años. Se distingue claramente entre las aproximaciones macromecánicas básicamente fenomenológicas y las mecanicistas, desarrolladas a partir de los años 80, que intentan modelar el comportamiento a través del estudio de los efectos locales que se producen en el compuesto al nivel microestructural. En esta breve exposición se ha dado una especial importancia al enfoque del estudio de la fatiga en compuestos a través de modelos de daño formulados en la mecánica de medios continuos, comentando en detalle los principales estudios en este campo. También se contemplan distintas estrategias de acumulación de daño para estudiar cargas cíclicas no estacionarias que permiten generalizar muchas de estas aproximaciones a casos reales de piezas en servicio.

En el capítulo 4 se presenta el tratamiento del fenómeno de la fatiga que se propone en este trabajo. Con esta metodología es posible crear un modelo constitutivo integrado en la mecánica de medios continuos que permite modelizar la degradación por acción de las

tensiones cíclicas de características variables. Se definen las formulaciones de las curvas S-N, de las curvas de resistencia residual y del modelo de acumulación de la degradación. En este capítulo se presenta también la implementación del modelo de degradación de la fatiga en un sistema de cálculo numérico. Se muestra una metodología que permite una linealización en el avance temporal (aplicación de ciclos de carga) independiente del modelo constitutivo del material (elástico, degradación progresiva y localizada, plasticidad, etc).

A continuación, en el capítulo 5, se presenta un modelo constitutivo para materiales compuestos. Se trata de un *mesomodelo* que permite obtener la respuesta del material compuesto como la adición del comportamiento de sus sustancias componentes. Mediante una generalización de la teoría de mezclas que permite tratar fenómenos como el *debonding* o la deslaminación, se compatibilizan los distintos modelos para obtener el comportamiento global del material. En el modelo cada constituyente puede tener formulado su propio modelo constitutivo no-lineal ya sea un modelo elástico, de daño continuo o de plasticidad. Los modelos constitutivos tienen capacidad para tratar materiales anisótropos mediante la teoría de *mapeo del espacio de tensiones*.

En el capítulo 6 se presentan ejemplos de aplicación de las formulaciones y modelos obtenidos en este trabajo. Primero se muestran algunos ejemplos donde se aplica la metodología presentada en el capítulo 4, implementada en un programa comercial de elementos finitos, para la predicción de la vida de una pieza en servicio de FRP durante la fase de diseño. A continuación se muestran ejemplos de comprobación y de validación del *mesomodelo* presentado en el capítulo 5 que permite el análisis de la degradación progresiva que va adquiriendo el material debido a la fatiga. Finalmente se exponen algunos ejemplos donde se considera una distribución estocástica de las propiedades estructurales del material para mostrar su influencia en la respuesta a fatiga del laminado.

En el capítulo 7 y último se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con este trabajo y se sugieren posibles futuras líneas de investigación para completarlo.

1.6. Referencias

- Barbero, Ever J. (1999). *Introduction to composite materials design*. Philadelphia ; London: Taylor Francis.
- Car, E. (1999). *Modelo constitutivo continuo para el estudio del comportamiento mecánico de los materiales compuestos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya (Dir: Sergio Oller, Eugenio Oñate).
- Car, E., Oller, S. y Oñate, E. (2000). *Tratamiento numérico de los materiales compuestos*. Vol. 57. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Gürdal, Zafer. (1999). *Design and optimization of laminated composite materials*. New York ; Wiley.
- Reifsnider, K.L. y Case, S.W. (2002). *Damage tolerance and durability of material systems*. NY: Wiley.
- Zalamea, F., Miquel Canet, J. y Oller, S. (2002). *Tratamiento numérico de materiales compuestos mediante la teoría de homogenización*. Vol. 64. Barcelona: CIMNE.

