

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS

1.1. DEFINICIÓN DE MATERIAL COMPUESTO

Un material compuesto es aquel formado por dos, o más, materiales distintos que presenta algunas propiedades físicas determinadas superiores a las de los materiales que lo constituyen. Ejemplos de estos tipos de materiales los encontramos en la antigüedad cuando el hombre fabricaba, por ejemplo, adobes reforzados con paja, o en la propia naturaleza como es el caso de un nido de golondrina o un árbol. Fijémonos en este último ejemplo: en un árbol, las fibras de madera resisten los esfuerzos mecánicos a los que el árbol pudiera estar sometido en el caso de que soplara el viento, mientras que las resinas naturales configuran las formas de esas fibras, manteniéndolas unidas y sirviendo como medio transmisor de cargas de unas fibras a otras. Otro ejemplo con el que estamos familiarizados es el hormigón armado; el hormigón, por si solo, resiste bien las tensiones de compresión, no así las de tracción; pero, sin embargo, el hormigón armado, gracias a las propiedades resistentes del acero en condiciones de tracción, hace que se puedan realizar elementos estructurales que se encuentren sometidos a flexión, y por tanto, traccionados en alguna zona.

Veamos un ejemplo que ilustra lo anterior. Consideremos una columna paralelepédica de una sección cuadrada de 30 cm de lado, tal como se indica en la Figura 1.1. Si el material del que está fabricado la columna fuera hormigón -cuya resistencia a compresión está comprendida entre 20 y 30 MPa-, la máxima fuerza de compresión que resistiría la columna sería igual al producto del área de la sección transversal de la misma por la resistencia del hormigón, lo que conduce a unos valores máximos de dicha carga comprendidos entre 1800 y 2700 kN, según el valor de la resistencia del hormigón que se tome. Si considerásemos el mismo problema anterior, pero ahora en condiciones de tracción, nos encontraríamos con la desagradable sorpresa de que la fuerza de tracción que sería capaz de resistir la columna sería muy inferior a la que se ha calculado anteriormente para el caso de compresión ya que, el hormigón, es un material que, en condiciones de tracción, presenta una resistencia un orden de magnitud inferior a la que posee en compresión; esto es, su resistencia a tracción se encuentra comprendida entre 2 y 3 MPa. Por tanto, la carga máxima de tracción que sería capaz de soportar la columna de hormigón estaría comprendida entre 180 y 270 kN, valores que son la décima parte de los obtenidos en condiciones de compresión. Si, en este último caso, hubiéramos embebido en el hormigón seis barras de acero de 2 cm de diámetro cada una de ellas, tal como se ve en la figura 1, obtendríamos

un "material compuesto", que denominamos hormigón armado, y la carga de tracción que podría soportar se incrementaría hasta 750 o 950 kN, dependiendo del valor que se tomara del límite elástico del acero.

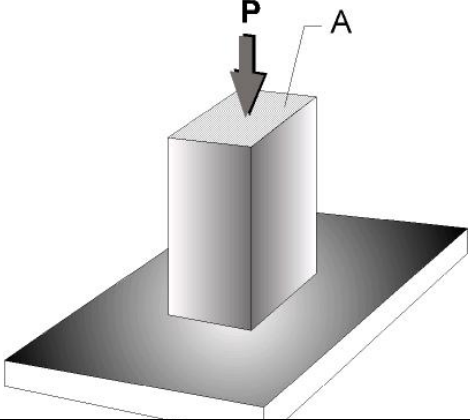
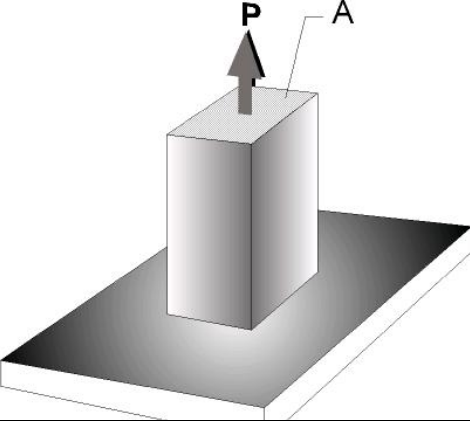
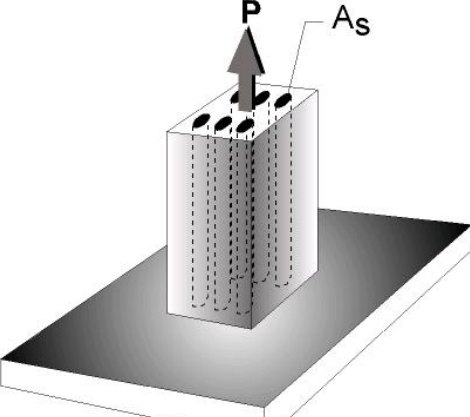
	$\frac{P_{\max}}{A} = 20 \div 30 \text{ MPa}$ $A = 30 \times 30 \text{ cm}^2$ $P_{\max} = 1800 \div 2700 \text{ kN}$
	$\frac{P_{\max}}{A} = 2 \div 3 \text{ MPa}$ $P_{\max} \approx 180 \div 270 \text{ kN}$
	$A_s \approx 6 \text{ barras de acero de}$ 2 cm de diámetro $P_{\max} \approx 750 \div 950 \text{ kN}$

Figura 1.1.

Atendiendo a la definición que se dio anteriormente de material compuesto, prácticamente la totalidad de los materiales de uso ingenieril pueden ser considerados como materiales compuestos. Así, por ejemplo, una aleación metálica es una combinación, a escala microscópica, de materiales diferentes aunque, desde el punto de vista

macroscópico, pudiera ser considerado como un material "homogéneo": sus propiedades físicas son las mismas independientemente de la parte del material que utilicemos para medirlas.

Volviendo al origen de la discusión sobre los materiales compuestos, la referencia bibliográfica más antigua -y, por tanto, la primera- relativa al uso de los materiales compuestos se encuentra en el capítulo quinto del libro del Éxodo de la Biblia en el que se dice, refiriéndose al faraón y en relación con el pueblo hebreo que tenía esclavizado, lo siguiente:

"⁶ El mismo día, el Faraón dio órdenes a los capataces y a los inspectores: ⁷ No volváis a proveerlos de paja para fabricar adobes, como hacíais antes; que vayan ellos a buscarla. ⁸ Pero el cupo de adobes que hacían antes se lo exigiréis sin disminuir nada.
.....

El pueblo se dispersó por todo el territorio egipcio buscando paja."

Este es un buen ejemplo para lo que se persigue demostrar: la misión de la paja en el adobe es la de reducir el agrietamiento interno en el seno del barro producido por su secado al sol. Por tanto, la paja no tiene ninguna misión resistente estructural dentro del adobe una vez que éste está seco aunque ha servido para disminuir su agrietamiento y, por ende, aumentar su resistencia mecánica.

Otro ejemplo histórico sobre el uso de los materiales compuestos se produjo durante la batalla del Atlántico, durante la II Guerra Mundial. Un problema que existía para las fuerzas aliadas, era las grandes pérdidas navales que estaban sufriendo en el centro del Atlántico debido a que la aviación no podía proteger a la armada ya que, en esa época, los aviones tenían un radio de acción más pequeño del que ahora tienen. Una solución a este problema la proporcionó el inglés Sir Geoffrey Pyke; la solución pasaba por situar un iceberg, convenientemente preparado, en el centro del Atlántico -tal como se indica en la Figura 1.2- que sirviera de plataforma de aterrizaje para que los aviones pudieran repostar. Pero surgió un problema: el hielo soporta mal los esfuerzos de flexión producidos por el oleaje (ver Figura 1.3) y, por tanto se rompería. Pero Sir Geoffrey no se rindió ante este nuevo problema estructural y proporcionó una solución: al agua que formaba los icebergs en el lago Newfoundland en Canada se le añadiría un 2% de pulpa de madera lo que mejoraría la resistencia a flexión del hielo. Por tanto la solución pasaba por el uso de un material compuesto: hielo reforzado con pulpa de madera. Al final de todo, transcurrió tanto tiempo, que los nuevos desarrollos técnicos de los aviones de combate aliados condujo a que estos aumentarían

considerablemente su radio de acción, lo que hizo innecesario llevar a efecto el proyecto de Sir Geoffrey.

Antes de continuar, conviene fijar que el concepto de material compuesto se va a restringir al caso de un material formado por la combinación de varios materiales diferentes y que, macroscópicamente, resulte heterogéneo. Como ejemplo de lo anterior podemos considerar un material formado por una matriz metálica reforzada por pequeñas partículas cerámicas. Sin embargo, a lo largo de este libro, el estudio se centrará, principalmente, en materiales compuestos formados por una matriz polimérica reforzada mediante fibras continuas, puesto que son los materiales compuestos de uso más común.

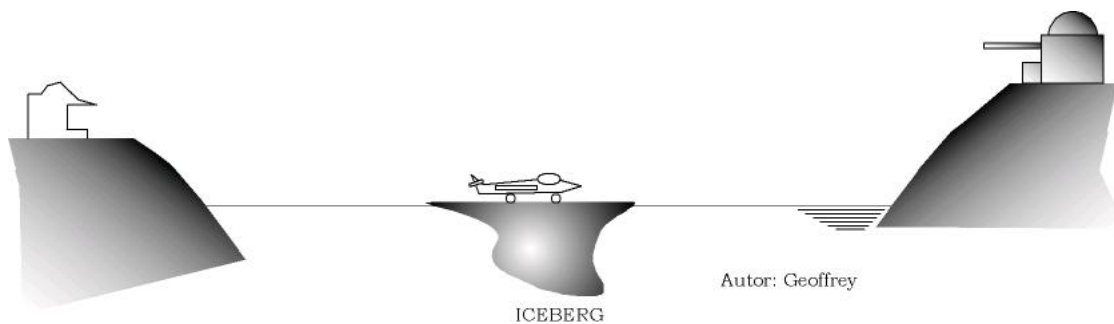


Figura 1.2.



Figura 1.3.

Como se ha dicho antes, el material compuesto presenta mejores características físicas o químicas que las que poseen sus materiales constituyentes por separado. Dentro de las propiedades de mayor interés ingenieril, que resultan mejoradas con estos materiales, podríamos citar:

- Resistencia mecánica
- Rigidez
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Ligereza
- Resistencia a la fatiga
- Aislamiento térmico y acústico

- Diseño artístico

Los materiales compuestos pueden clasificarse en diferentes categorías:

- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con fibras de otro material distinto.
- Laminados compuestos que consisten en un conjunto de láminas de diferentes materiales unidas unas a otras.
- Materiales compuestos formados por una matriz reforzada con partículas de otro material diferente.

En la primera categoría de materiales compuestos que se acaba de citar, el uso de fibras viene motivado porque, desde los puntos de vista resistente y de rigidez, una fibra de un material tiene unas propiedades mejores que el mismo material en forma de cuerpo. A modo de ejemplo: una placa de vidrio rompe a una tensión de unos cuantos MPa mientras que, la fibra de vidrio, presenta una resistencia comprendida entre 3 y 5 GPa; es decir, la resistencia aumenta en tres ordenes de magnitud. La explicación de este hecho se basa en que la densidad de defectos (dislocaciones) dentro de la fibra es menor que en el vidrio: la estructura cristalina de la fibra es mucho más perfecta que la de la placa de vidrio.

Tras la explicación anterior podría surgir el dilema sobre cuál debe ser la longitud de las fibras. En otras palabras: ¿deben emplearse fibras largas o cortas (denominadas whiskers en inglés)? En una primera respuesta podría pensarse en el uso de fibras cortas como refuerzo ya que, para un mismo material, su resistencia mecánica cuando se presenta en forma de fibra corta es superior a cuando lo hace como fibra larga puesto que, la primera, presenta una estructura cristalina más perfecta que la segunda. Así, por ejemplo, la resistencia del acero estructural (cuyo material constituyente principal es el hierro) es del orden de 0,55 GPa mientras que la de un "whisker" de hierro se encuentra en torno a 20 GPa. Sin embargo, resulta mucho más fácil orientar, en una determinada dirección, las fibras largas que los whiskers por ser éstos más cortos.

Tratando de acotar aún más el objeto del estudio que aquí se presenta, se considerará en lo que sigue materiales compuestos formados por una matriz polimérica reforzada por fibras largas. La misión de las fibras es proporcionar al material compuesto las características de rigidez y resistencia necesarias, mientras que las misiones de la matriz son actuar como vehículo transmisor de fuerzas entre las fibras y proporcionar una configuración geométrica a las fibras.

Con objeto de empezar a fijar unos órdenes de magnitud de las propiedades que se pueden conseguir con un material compuesto, en la Tabla 1.1 se resumen varias de ellas para diferentes materiales estructurales metálicos y, también, para las fibras y matrices normalmente utilizadas en los materiales compuestos de matriz polimérica. En dicha tabla, ρ representa la densidad; E el módulo de elasticidad; σ_R^t la resistencia a tracción; ε_R la deformación en rotura; α el coeficiente de dilatación lineal; k el coeficiente de conductividad térmica y, finalmente, aparece el precio aproximado de dichos materiales por kilogramo en 1985.

MATERIAL	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	σ_R^t (GPa)	ε_R	α (°C ⁻¹)	K (W/m°C)	Precio (pts/kg)
METALES							
Acero	7800	205	0.4 ÷ 1.6	1.8	1.3·10 ⁻⁵	20 ÷ 100	100
Aleación lig. Al	2800	75	0.45	-	2.2·10 ⁻⁵	80 ÷ 150	500
Cobre	8600	125	0.2 ÷ 0.5	-	1.7·10 ⁻⁵	380	-
Vidrio R	2500	86	3.2	5.0	0.3·10 ⁻⁵	1	2500
Vidrio E	2600	74	2.5	4.5	0.5·10 ⁻⁵	1	1000
Carbono HR	1750	230	3.2	1.3	0.02·10 ⁻⁵	100÷200	30000
Carbono HM	1800	390	2.5	0.6	0.08·10 ⁻⁵	100÷200	35000
Boro	2600	400	3.4	0.8	0.04·10 ⁻⁵	-	70000
Cerámica	3900	380	1.4	0.4	-	-	-
Aramida	1450	130	2.9	2.6	0.2·10 ⁻⁵	0.03	10000
Polipropileno	900	1.1 ÷ 1.4	0.025	-	-	-	-
Poliamida	1200	2.7	0.075	17	8.5·10 ⁻⁵	0.06	-
Policarbonato	1200	2.4	0.06	-	-	-	-
Fenólicas	1300	3.0	0.04	-	-	-	-
Epoxi	1200	4 - 5	0.13	3 ÷ 6	9 ÷ 13·10 ⁻⁵	-	800
Poliéster	1200	4	0.06 ÷ 0.1	2.5	2·10 ⁻⁵	0.021	800

Tabla 1.1. Propiedades físicas de diversos materiales.

La comparación de las propiedades de los materiales compuestos frente a las de otros materiales queda recogida en las figuras 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7.

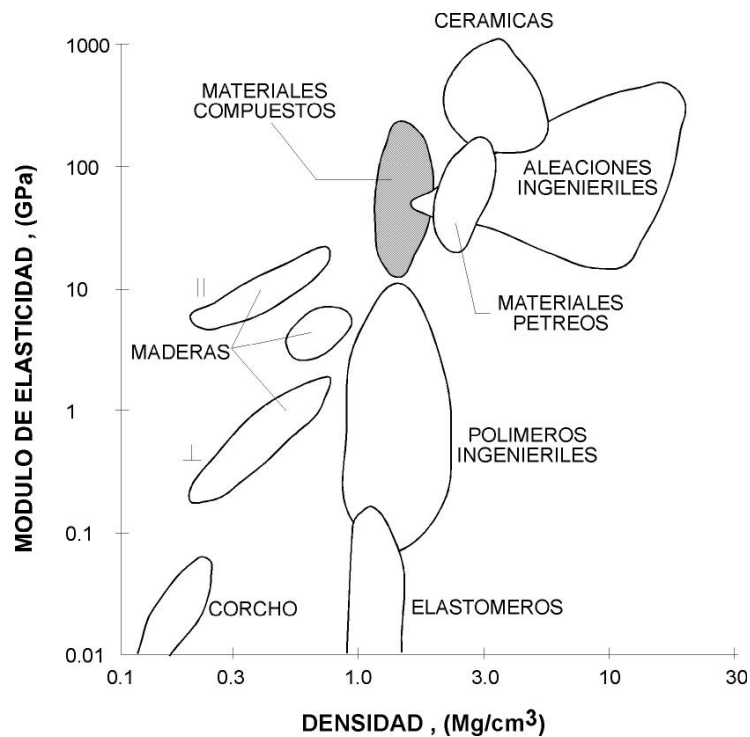


Figura 1.4.

En la Figura 1.4 se ha representado el valor del módulo de elasticidad - una medida de la rigidez- frente a la densidad pudiéndose observar, por ejemplo, que los materiales compuestos ofrecen una rigidez similar a la de las aleaciones metálicas ingenieriles pero con menos peso. En dicha figura se recoge otro aspecto importante de cara al comportamiento mecánico de los materiales compuestos: en el caso de las maderas, el módulo de elasticidad aumenta en diez órdenes de magnitud si dicho parámetro se mide en la dirección de la fibras (símbolo "=" en la figura) respecto al obtenido en dirección perpendicular a las mismas (⊥ en la figura).

En la Figura 1.5 se observa la variación de la tenacidad de fractura - una medida de la resistencia del material a la rotura cuando, en su seno, existe una fisura- de diferentes materiales frente a su módulo de elasticidad. Como se observa, los materiales compuestos presentan unas tenacidades de fractura equiparables a las de las aleaciones metálicas de uso ingenieril manteniendo una rigidez parecida.

En la Figura 1.6 se compara la tenacidad de fractura frente a la resistencia a la compresión observándose, una vez más, que los

materiales compuestos presentan unas propiedades dentro del rango de las que ofrecen las aleaciones metálicas.

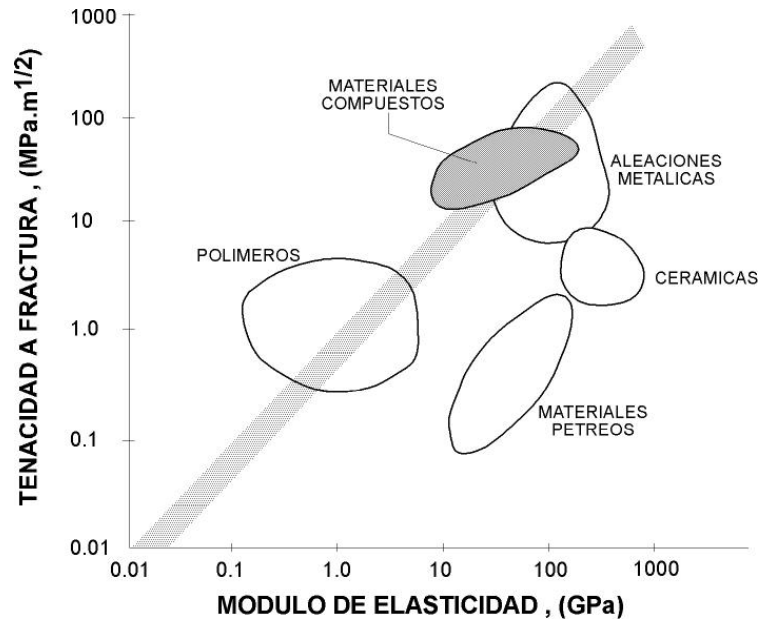


Figura 1.5.

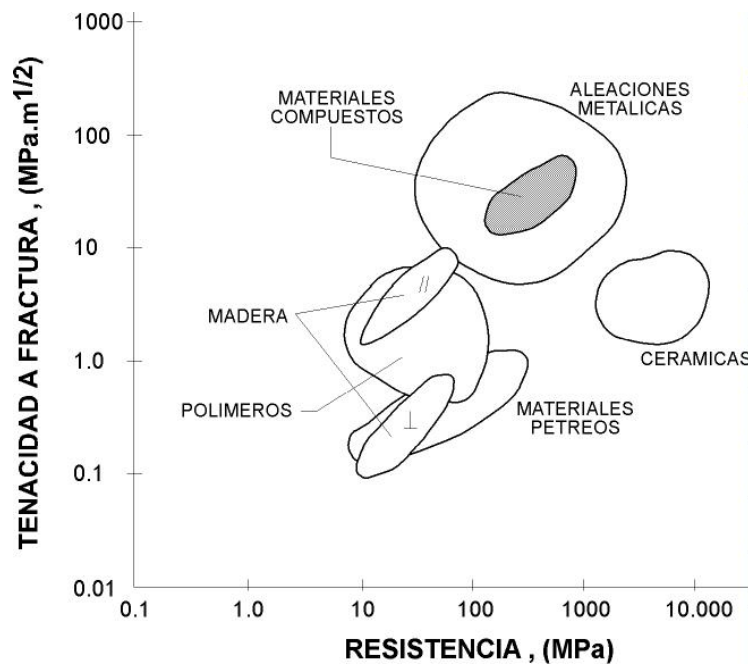


Figura 1.6.

Finalmente, en la Figura 1.7, se muestra la variación del límite de fatiga -amplitud de la variación de tensión que, aplicada de forma cíclica sobre el elemento estructural que se esté analizando, no produce su fisuración y, eventualmente, su rotura-, frente a su densidad. Se observa, una vez más, las altas prestaciones de los materiales compuestos ante este tipo de solicitaciones.

No quedaría completo este apartado introductorio al diseño con materiales compuestos si no se incluyera una breve información sobre costes comparativos entre la utilización de materiales convencionales y materiales compuestos para distintos problemas ingenieriles y sin que se presentara la evolución y tendencia del mercado de estos materiales que nos ocupan.

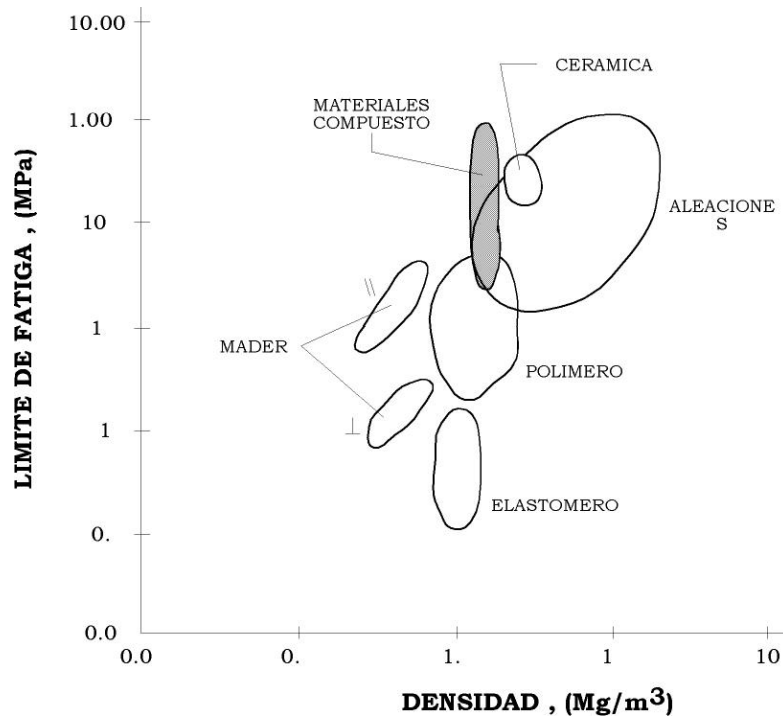


Figura 1.7.

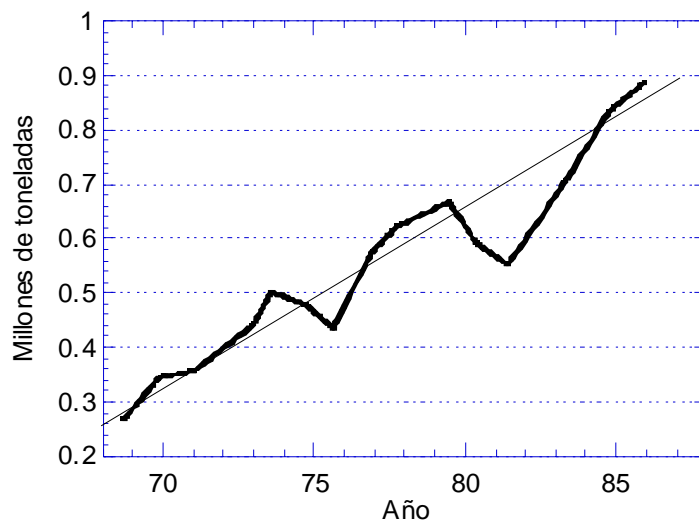


Figura 1.8.

En la Figura 1.8 se muestra la creciente evolución del mercado europeo de los materiales compuestos y, en la Tabla 1.2., se recoge la distribución por sectores en el mercado europeo de los materiales

compuestos, pudiéndose observar que los sectores de transporte y electricidad representan el 44% del mercado total de estos materiales.

(en %)	1986	1987
Transportes	20	21
Electricidad	21	23
Construcción	15	17
Material Industrial y Agrícola	18	15
Deportes	6	7
Bienes de consumo	7	6
Diversos	13	11
TOTAL	100	100

Tabla 1.2.