



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Master en Mecánica Estructural Avanzada

Mecánica de Materiales Compuestos

Tema 1. Introducción a los materiales compuestos

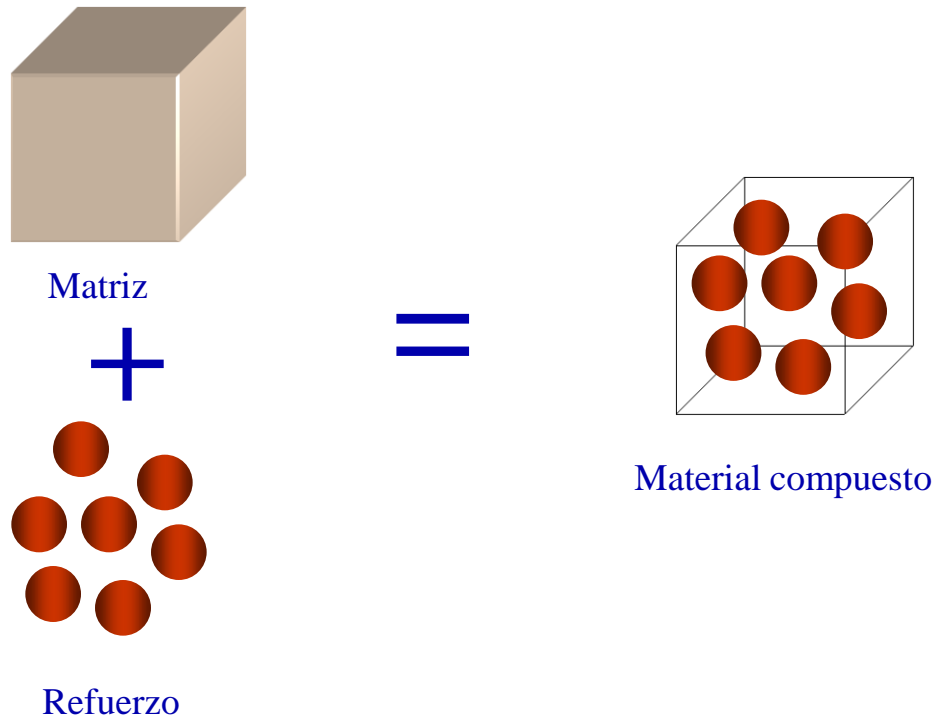
Curso 2010/2011



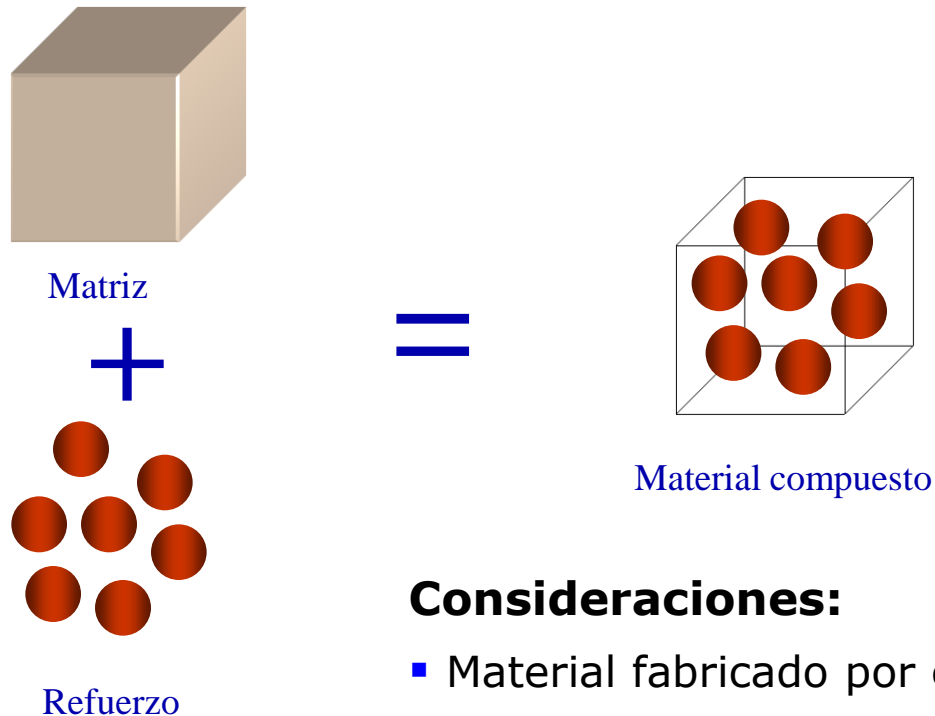
Tema 1. Introducción a los materiales compuestos

ÍNDICE

- Definición
- Ventajas e inconvenientes
- Tipologías
 - Refuerzo por partículas
 - Refuerzo por fibras
 - Refuerzo por plaquetas
 - Laminados
- Estructuras sándwich
- Aplicaciones



Material formado por dos o más constituyentes, de forma que las propiedades del conjunto sean superiores a las de los componentes por separado



Consideraciones:

- Material fabricado por el hombre
- No existe reacción química entre los componentes
- Material macroscópicamente heterogéneo
- Material “avanzado”

No se considerarían materiales compuestos:

- **Materiales naturales**

- Madera (fibras enrolladas de celulosa+lignina)
- Hueso (colageno+cristales inorgánicos+agua+grasas)
- Músculos

- **Materiales tradicionales o macroscópicamente homogéneos**

- Hormigón
- Aleaciones metálicas
- Adobe



¿ Por qué usar materiales compuestos?

- ◆ Por su alta resistencia
- ◆ Por su bajo peso
- ◆ Por su flexibilidad
- ◆ Por su estabilidad dimensional
- ◆ Por su alta resistencia dieléctrica
- ◆ Por su capacidad de consolidación de partes
- ◆ Por su resistencia a la corrosión
- ◆ Por su variedad de acabados

¿ Por qué usar materiales compuestos?

- ◆ Por su alta resistencia
- ◆ Por su bajo peso
- ◆ Por su flexibilidad
- ◆ Por su estabilidad dimensional
- ◆ Por su alta resistencia dieléctrica
- ◆ Por su capacidad de consolidación de partes
- ◆ Por su resistencia a la corrosión
- ◆ Por su variedad de acabados

Fibra de carbono:

*2-8 veces más resistente que el acero
4 veces más ligero*

*7 veces más resistente que el aluminio
1,5 veces más ligero*

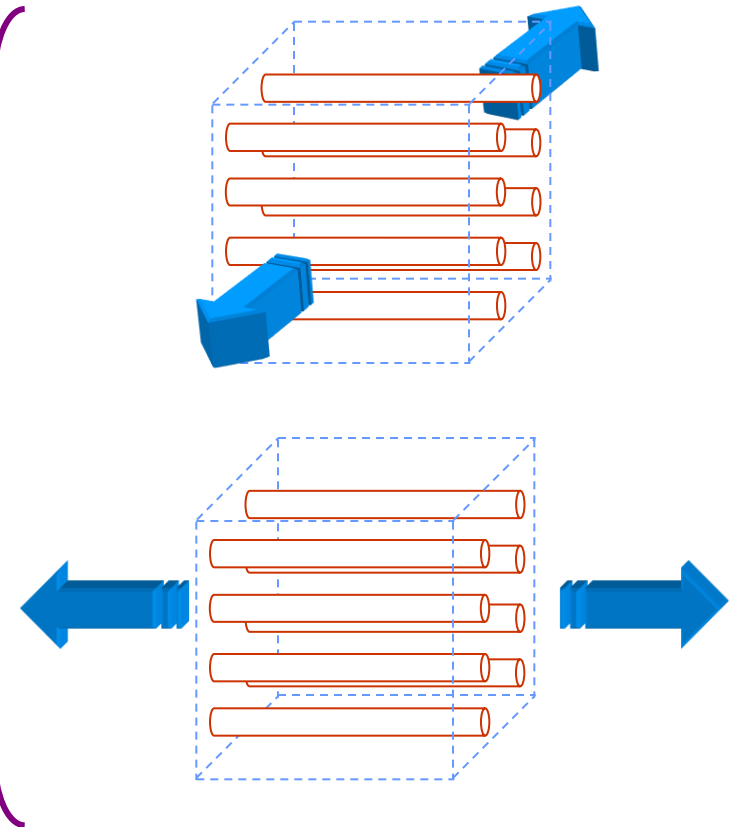
Fibra de vidrio:

*2-6 veces más resistente que el acero
3 veces más ligero*

*5 veces más resistente que el aluminio
Densidades similares*

¿ Por qué usar materiales compuestos?

- ◆ Por su alta resistencia
- ◆ Por su bajo peso
- ◆ Por su flexibilidad
- ◆ Por su estabilidad dimensional
- ◆ Por su alta resistencia dieléctrica
- ◆ Por su capacidad de consolidación de partes
- ◆ Por su resistencia a la corrosión
- ◆ Por su variedad de acabados





¿ Por qué usar materiales compuestos?

- ◆ Por su alta resistencia
- ◆ Por su bajo peso
- ◆ Por su flexibilidad
- ◆ Por su estabilidad dimensional
- ◆ Por su alta resistencia dieléctrica
- ◆ Por su capacidad de consolidación de partes
- ◆ Por su resistencia a la corrosión
- ◆ Por su variedad de acabados

Limitaciones de los materiales compuestos

- ◆ Existe la creencia de que no son duraderos
- ◆ No existe una tradición de diseño con estos materiales
- ◆ Las herramientas de cálculo no son tan conocidas ni están ampliamente extendidas como para los metales
- ◆ Falta información sobre su comportamiento
- ◆ El coste de la materia prima es elevado
- ◆ En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación
- ◆ El peligro de fuego puede ser mayor en ciertos materiales
- ◆ Los mecanismos de daño son más complejos

Coste

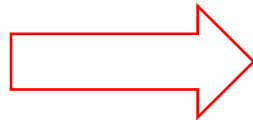
- **Materia prima**

- **Procesos de fabricación**

- **Diseño**



Elevados



Menores que los metales

Atendiendo al tipo de matriz

- ◆ **Matriz polimérica (PMCs)**

 - Polímeros Termoestables (poliester, epoxi, fenólica, ...)

 - Polímeros Termoplásticos (polipropileno, poliamida, ...)

- ◆ **Matriz metálica (MMCs)**

 - Aleaciones de aluminio

 - Aleaciones de titanio

 - Aleaciones de cobre

- ◆ **Matriz cerámica (CMCs)**

 - Alúmina

 - Carburo de silicio

 - Nitruro de silicio

Atendiendo al tipo de matriz

- ◆ **Matriz polimérica (PMCs)**

 - Polímeros Termoestables (poliester, epoxi, fenólica, ...)

 - Polímeros Termoplásticos (polipropileno, poliamida, ...)

- ◆ **Matriz metálica (MMCs)**

 - Aleaciones de aluminio

 - Aleaciones de titanio

 - Aleaciones de cobre

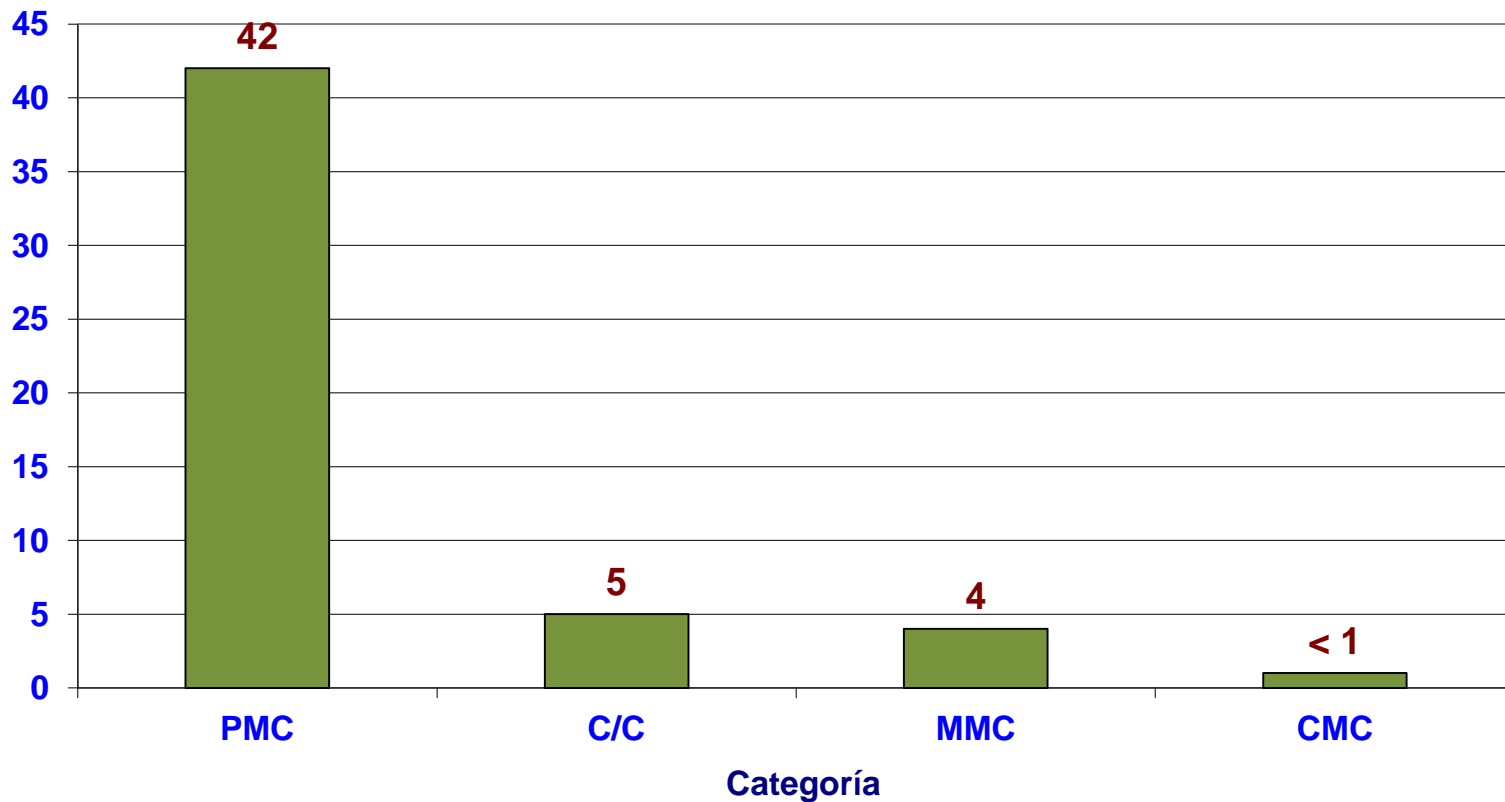
- ◆ **Matriz cerámica (CMCs)**

 - Alúmina

 - Carburo de silicio

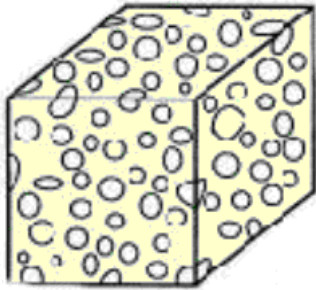
 - Nitruro de silicio

Producción anual Materiales compuestos avanzados (en miles de toneladas)

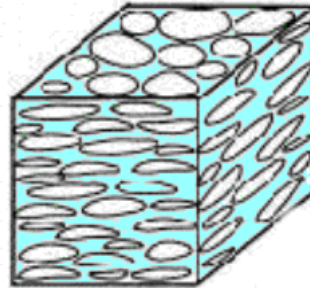


Atendiendo al tipo de refuerzo

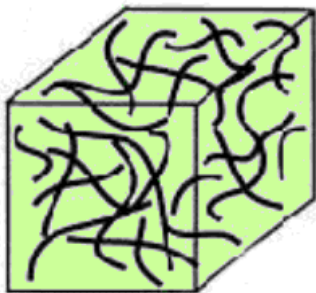
Refuerzo discontinuo



Partículas



Plaquetas



Fibras cortas

Orientadas
Orientación aleatoria

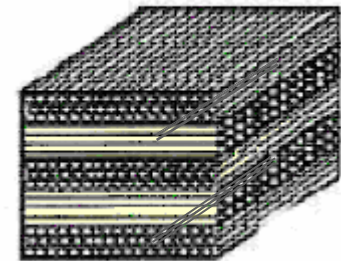
Refuerzo continuo

Fibras largas

- Orientadas
- Orientación aleatoria

Tejidos

Laminados





- ◆ **El aumento de propiedades es modesto**
- ◆ **El comportamiento mecánico suele ser isótropo**
- ◆ **Son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos**

Partículas cerámicas incrementan la rigidez y la temperatura de servicio de las matrices metálicas

Partículas dúctiles aumentan la tenacidad de fractura en matrices frágiles

En los materiales cerámicos las partículas pueden incrementar diferentes propiedades mediante varios mecanismos (dureza, resistencia mecánica, tenacidad...)

¿ Por qué refuerzan las fibras ?

La resistencia mecánica de los materiales es muy inferior a la que podrían alcanzar

La resistencia teórica de un material corresponde a la carga necesaria para romper los enlaces entre átomos

La discrepancia en los valores de las propiedades se debe a la presencia de defectos en el material

Reducir los defectos incrementa la resistencia

¿ Por qué refuerzan las fibras ?

Particularmente negativos son los defectos perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga



Si el material está en forma de fibra no pueden existir grandes defectos transversalmente debido a la pequeña sección de las fibras

Resistencia Mecánica

- Placa de vidrio: Pocos MPa
- Acero estructural: 0,4 GPa
- Fibra de vidrio: 3-5 GPa

Tipos de presentaciones de las fibras

- ◆ **MAT:**
 - De superficie
 - De hilos cortados
 - De hilos continuos

- ◆ **Roving**
- ◆ **Complejos**
- ◆ **Hilos cortados**
- ◆ **Fibra molida**

Fibras cortas

- ◆ La sección transversal puede ser circular, cuadrada o hexagonal
- ◆ Diámetros: 2,5 micras – 0,1 mm
- ◆ Esbeltez: $L/D \sim 100$

Whiskers

Fibras cortas monocristalinas, virtualmente sin defectos

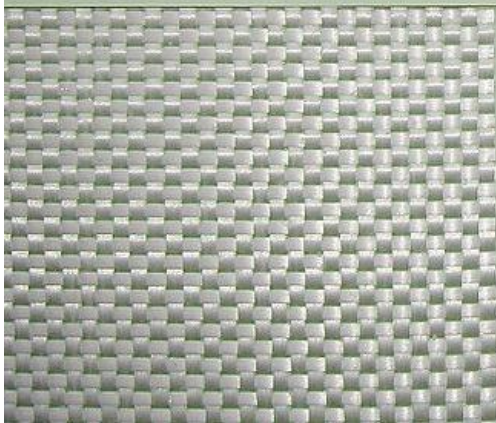
Acero: Resistencia mecánica 0,4 GPa

Whisker de acero: Resistencia mecánica 20 GPa

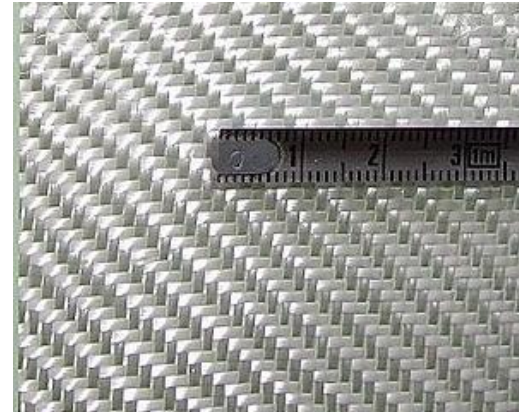
*Los **Whiskers** presentan un grave riesgo para la salud si se inhalan*

Tejidos

- ◆ **Telas o tafetanes (*Plain Weave*)**
- ◆ **Saten (*Crowfoot satin*)**
- ◆ **Sarga (*Twill*)**



Tafetán de vidrio



Sarga de vidrio

Tejidos

Otros tejidos

- Tejidos unidireccionales
- Tejidos híbridos
- Tejidos tridimensionales



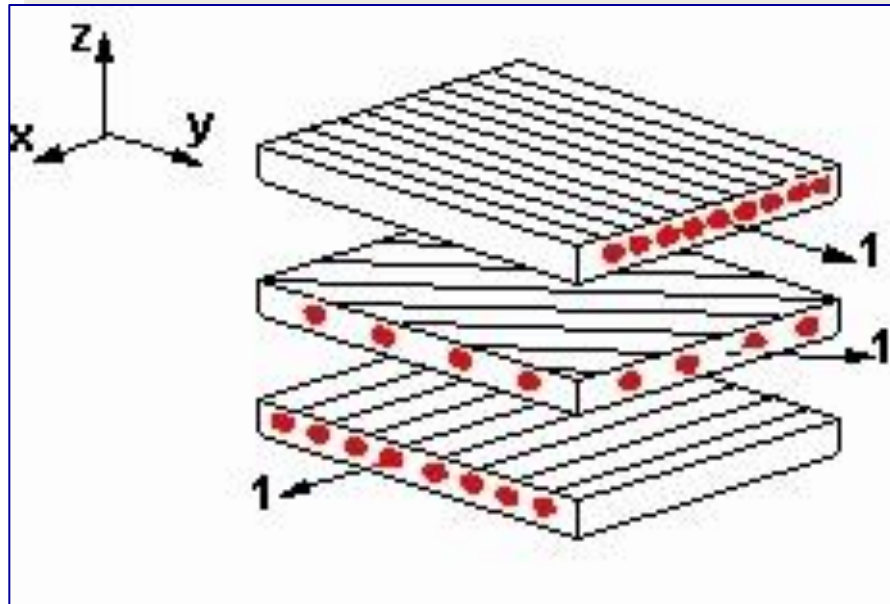


Son una solución de compromiso ante el problema de los whiskers

No se consiguen propiedades elevadas

Se pueden alcanzar mayores grados de compactación que con partículas o whiskers

Como son aproximadamente bidimensionales presentan igual resistencia en su plano



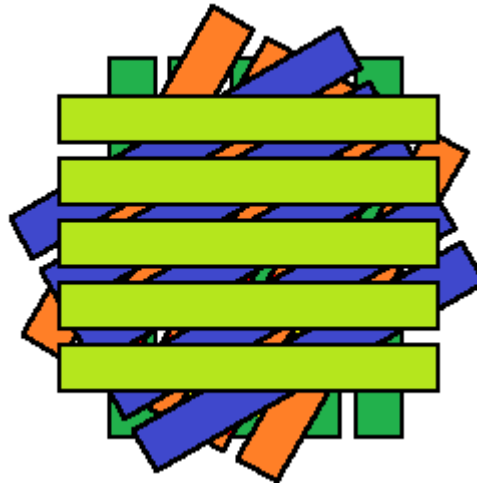
Son materiales compuestos formados por apilamiento de capas de espesor muy pequeño, denominadas láminas.

Las lámina es la unidad de los materiales compuestos. Es un material de capa única de muy pequeño espesor (0,1-1 mm)

Cada lámina puede ser un material:

- De fibra corta
- De fibra larga
- Tejido 2D

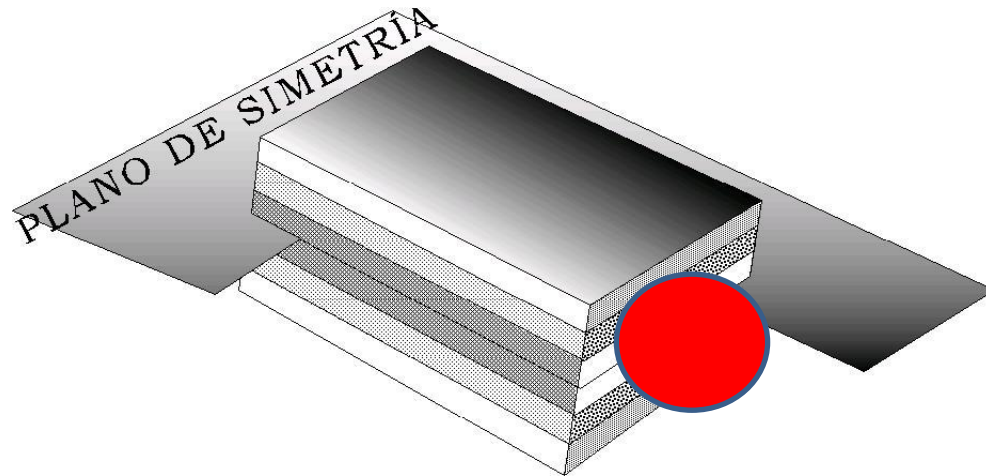
Definición de laminados



Sublaminado: Los laminados se forman a partir de la repetición de un número finito de láminas con diferentes orientaciones

Ejemplo: [0 / 45 / -45 / 90]

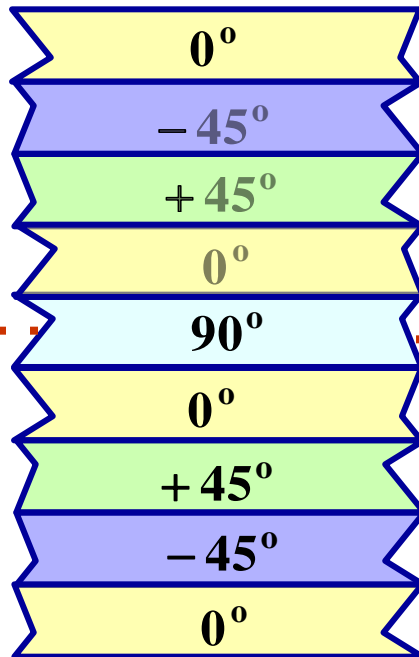
Definición de laminados



- Las láminas se definen desde el exterior hacia el interior del laminado.
- Se indicará con un número el ángulo que forman las fibras con la dirección de referencia y, mediante un subíndice, el número de láminas repetidas con esa orientación.
- Se utilizará el subíndice **T** para indicar que el laminado ha sido definido en su totalidad.
- En laminados simétricos, sólo se expresará la secuencia de apilamiento de uno de los lados y utilizando el subíndice **S** para indicar la simetría.

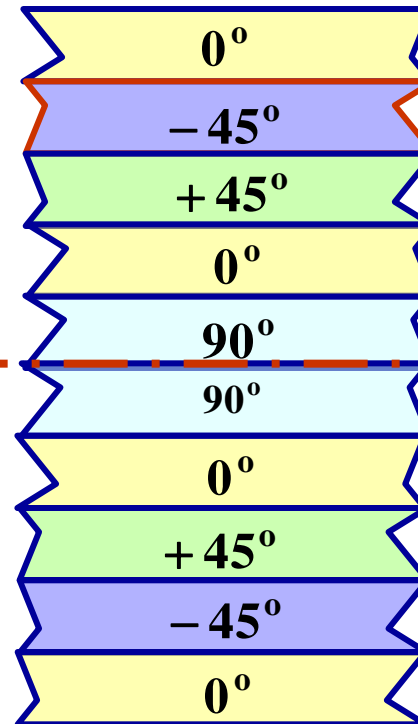
Definición de laminados

$$[0/\mp 45/0/90]_s'$$



Plano
medio

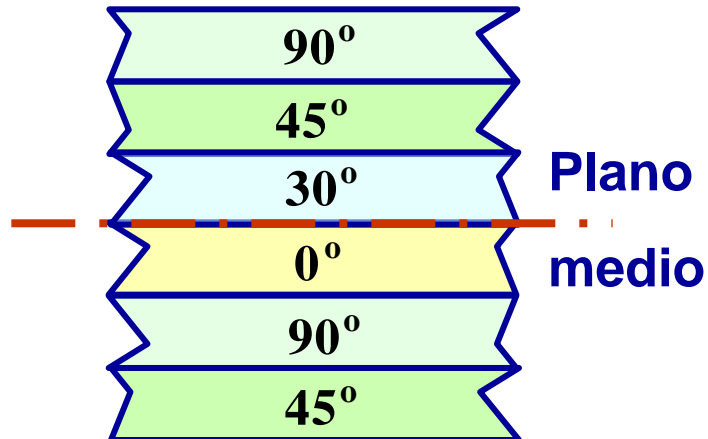
$$[0/\mp 45/0/90]_s$$



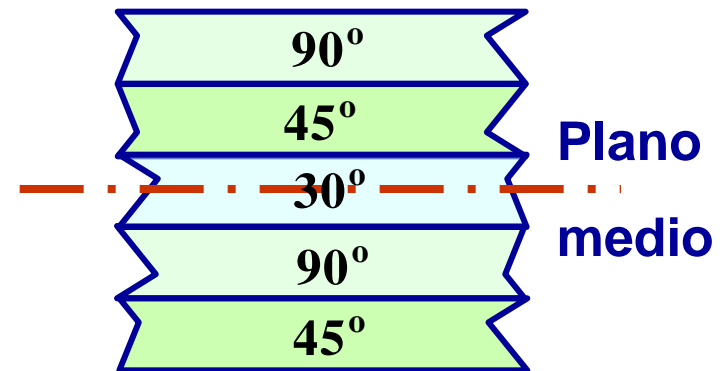
Plano
medio

Definición de laminados

$[90/45/30/0/90/45]$



$[90/45/30/90/45]$



Tipo de constituyentes

Fibras

- ◆ Vidrio
- ◆ Carbono
- ◆ Aramida
- ◆ Polietileno
- ◆ Boro
- ◆ Carburo de silicio

Matrices

- ◆ Epoxi
- ◆ Poliester
- ◆ Vinilester
- ◆ Resina fenólica
- ◆ Polipropileno
- ◆ Poliamida
- ◆ Policarbonato

Fibras : Vidrio

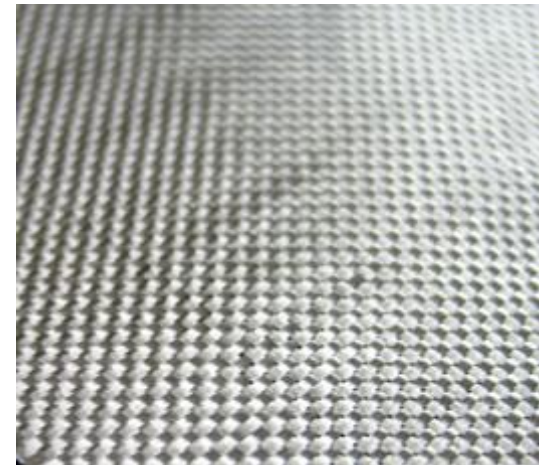
Es el refuerzo más utilizado en la fabricación de materiales compuestos

Historia:

- Antiguo Egipto: Refuerzo en vasos y ánforas
- Siglo XVIII: Primeros tejidos
- 1938: Fabricación industrial

Propiedades

- Bajo coste
- Resistencia a la corrosión
- Alta adherencia fibra-matriz
- Aislante eléctrico
- Permeabilidad dieléctrica
- Bajo coeficiente de dilatación
- Alta resistencia mecánica pero menor que otras fibras



Fibras : Vidrio

Variedades de fibra de vidrio

Vidrio E. La más empleada, presenta un balance adecuado de propiedades con un coste moderado.

Vidrio R o S. De mayores características mecánicas, resistencia y rigidez. Empleada en aeronáutica y en defensa.

Vidrio D. Altas propiedades dieléctricas. Se utiliza en aplicaciones donde se precise permeabilidad a las ondas electromagnéticas.

Vidrio A. Menores resistencia y rigidez que el vidrio E pero con mayor resistencia al ataque químico.

Fibras : Vidrio

Propiedades

Propiedad	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
ρ (Kg/m ³)	2500	2580	2480	2590
σ_R (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
E (GPa)	69	73	86	85

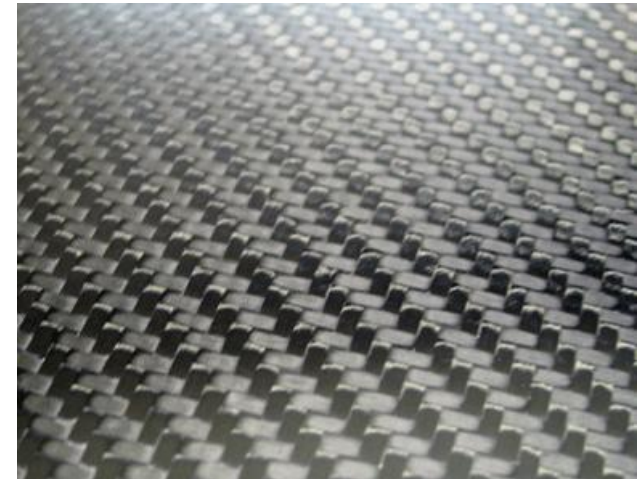
Fibras : Carbono

Es la fibra con mejores propiedades mecánicas combinadas con una densidad baja

Historia: - Siglo XIX. Edison, fabricación de filamentos de bombillas
- Años 60. Inicio de la fabricación industrial

Propiedades

- Altas propiedades mecánicas
- Material anisótropo
- Baja resistencia al impacto
- Gran estabilidad dimensional asociada a un coeficiente de dilatación muy bajo
- Conductividad térmica elevada
- Puede favorecer la corrosión galvánica
- Buena resistencia a la fatiga



Fibras : Carbono

Propiedades

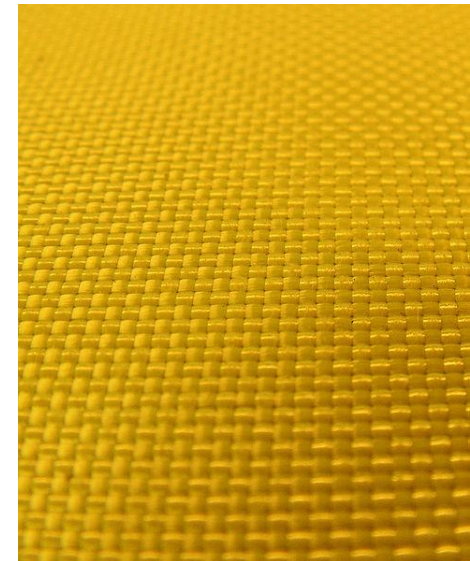
Propiedad	HR	HM	III
ρ (Kg/m ³)	1740- 1760	1810- 1870	1820
σ_R (GPa)	2,6 - 5	2,1 - 2,7	3,1
E_L (GPa)	230	390	290
E_T (GPa)	15	6	
G (GPa)	50	20	
ν	0,3	0,35	

Fibras : Arámida

Es una fibra orgánica sintética fabricada por hilado de un polímero (poliamida aromática de tipo politereftalato de polifenilendiamina)

Historia:

- **Desarrollo: 1960-1970**
- **Actualidad: Diversos fabricantes y denominaciones**
 - AKZO → **TWARON®**
 - DUPONT → **KEVLAR®**
 - TEIJIN → **TECNORA®**
 - NOMEX**



Fibras : Arámida

Propiedades

- Presenta una elevada resistencia específica
- Gran resistencia al impacto y alta capacidad de absorción de energía
- Alta rigidez
- Baja resistencia a compresión
- Material dúctil con una gran tenacidad
- Buena estabilidad mecánica en un amplio rango de temperatura
- Es resistente a la llama y autoextinguible
- La humedad puede hacer disminuir sus propiedades
- Tiene problemas de fotodegradación
- Baja adherencia con determinadas matrices, especialmente las termoplásticas

Fibras : Arámida

Variedades de fibras:

- De bajo módulo
- De alto módulo

Propiedades

Propiedad	Kevlar 29	Kevlar 49
ρ (Kg/m ³)	1440	1450
σ_R (GPa)	1,92	2,94-3,6
E_L (GPa)	60	130
E_T (GPa)		5,4

Otras fibras

Fibra de polietileno

- Es una fibra orgánica de propiedades similares a la aramida
- Posee una baja densidad (970 kg/m^3)
- Mala adherencia con las matrices

Fibras de boro

- Material duro y de elevada temperatura de fusión
- Buena resistencia a compresión
- Alta rigidez
- Muy alto coste



Otras fibras

Fibras de carburo de silicio

- Menor coste que las de boro
- Se emplean en aplicaciones que requieren alta resistencia a temperaturas elevadas
- Son unas de las fibras empleadas en forma de whisker
- Uso no extendido

Ventajas e inconvenientes de las fibras

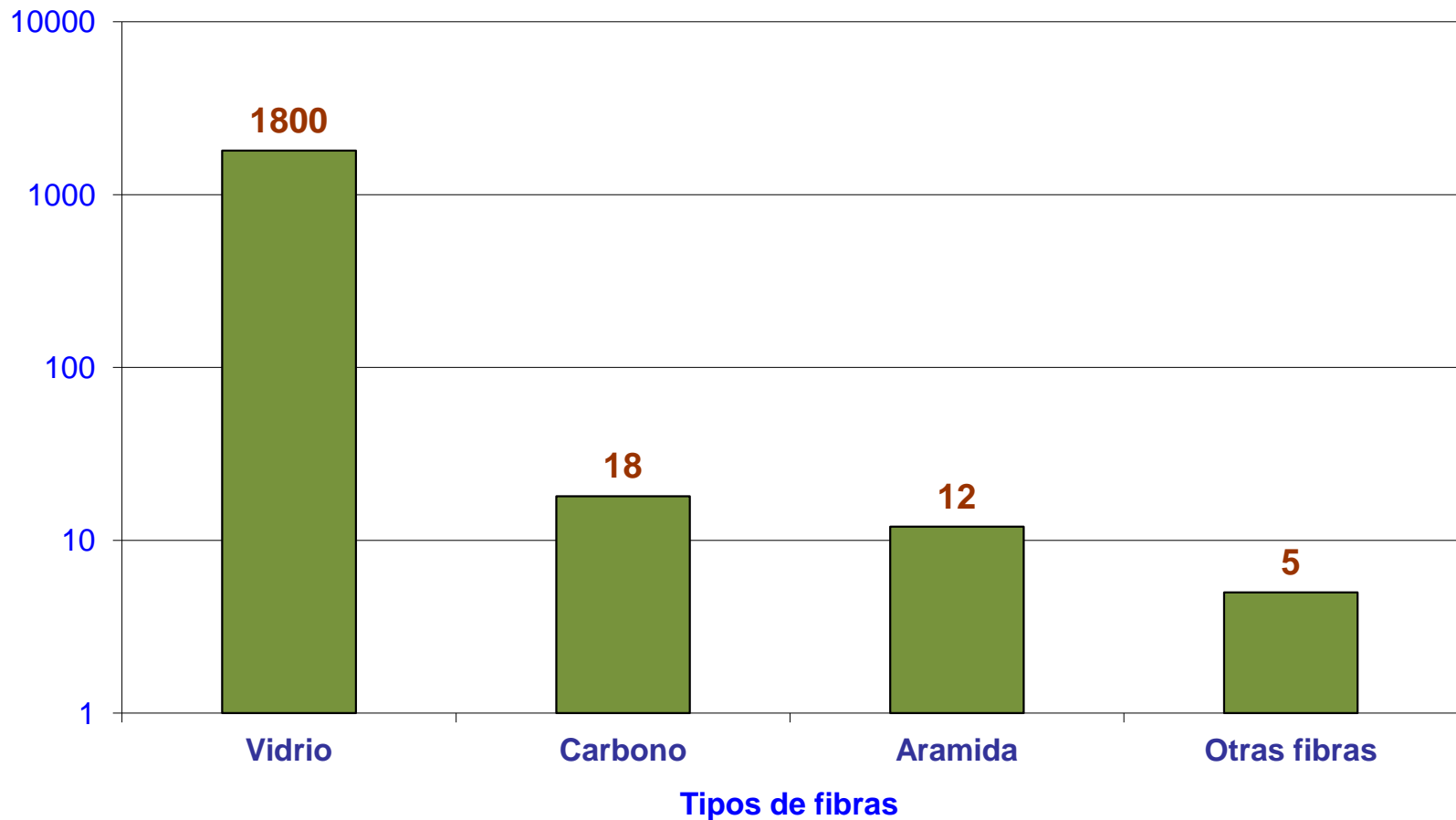
Tipo de fibra	Ventajas	Inconvenientes
Vidrio	Alta resistencia Bajo coste	Baja rigidez Mal comp. a fatiga Sensibilidad a alta temp.
Aramida	Alta resistencia a tracción Baja densidad	Baja resistencia compresión Alta absorción de humedad
Boro	Alta rigidez Alta resistencia a compresión	Coste elevado
Carbono	Alta resistencia Alta rigidez	Alto coste
Cerámicas	Alta rigidez Uso a elevada temp.	Baja resistencia Alto coste

Ventajas e inconvenientes de las fibras

Tipo	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Densidad (kg/m³)
Vidrio-E	3450	72,5	2540
Vidrio-S	4480	85,6	2490
Carbono AS4	3730	235	1810
Carbono IM-7	5170	290	1980
Grafito GY-70	1725	517	1800
Boro	3280-3660	365-414	2100-3000
Kevlar	3800	131	2020

Ventajas e inconvenientes de las fibras

Producción anual de fibras en el mundo
(en miles de toneladas)



Matrices

Funciones de la matriz

- Transmitir la fuerza entre las fibras
- Mantener las fibras en su posición
- Proteger a las fibras del medio ambiente

Requerimientos de la matriz

- Resistencia a cortadura
- Tenacidad
- Resistencia a la humedad y al medio ambiente
- Coste



Tipos de matrices poliméricas

Matrices termoestables

Resina epoxi
Resinas poliéster
Resinas fenólicas
Resinas vinilester

Matrices termoplásticas

Polipropileno
Poliamidas
Policarbonato

Matrices termoestables

Resina epoxi

Es un polímero termoestable que contiene en su molécula dos o más funciones epoxídicas o glicídica.

Propiedades

- Buenas propiedades mecánicas hasta 180°C
- Buena resistencia a los agentes químicos, especialmente a los ataques de alcali
- Pose una buena concentración durante la polimerización
- Es bastante sensible a la presencia de humedad
- Requiere un agente de curado

Matrices termoestables

Resina poliéster

Constituyen la familia más importantes de las resinas termoestables utilizadas en la fabricación de materiales compuestos.

Propiedades

- Gran capacidad para impregnar las fibras de vidrio
- Permite conseguir materiales compuestos con buenas propiedades mecánicas y gran ligereza
- Son productos inestables que requieren un almacenamiento controlado

Matrices termoestables

Resina poliéster

Las resinas poliéster se obtienen mediante la policondensación de uno o varios glicoles con uno o varios diácidos donde por lo menos uno de ellos contiene el doble de enlace etilénico

Variantes

- Resinas anticorrosión (frente a ácidos, álcalis, agua)
 - Resinas bisfenólicas
 - Resinas isoftálicas
 - Resinas teresftálicas
- Alimentarias, con bajo porcentaje de estireno
- Resinas resistentes al fuego, modificadas con constituyentes de base halógenos

Matrices termoestables

Resina fenólica

Se denomina resina fenólica al polímero resultante de la reacción de un fenol y de un aldehído

Fueron las primeras resinas en utilizarse para la fabricación de materiales compuestos

Propiedades

- Buenas propiedades mecánicas
- Son resistentes al choque y a la abrasión
- Mantienen una alta resistencia a temperaturas elevadas
- Resistentes al ataque químico
- Buena resistencia al fuego

Matrices termoestables

Resina poliéster

Son el resultado de una poliadicción de resina epoxi sobre el ácido insaturado acrílico o metaacrílico

Propiedades

- Buenas propiedades mecánicas, especialmente a fatiga
- Excelente fluidez
- Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo
- Resistencia a la corrosión
- Buena resistencia al fuego mediante la incorporación de aditivos
- Mayor coste que el poliéster

Matrices termoplásticas

Polipropileno

- Punto de fusión: 170°C
- Densidad: 905 kg/m³
- Sensible al frío
- Se ven afectadas por la luz ultravioleta
- Admite mejor las fibras que otras resinas termoplásticas

Poliamida (Nylon)

- Elevada resistencia, tenacidad y elasticidad
- Son resistentes a la abrasión y el ataque químico
- Conservan sus propiedades mecánicas hasta los 150°C
- Baja densidad (1040-1050 kg/m³)
- Absorben fácilmente agua que afecta a sus propiedades

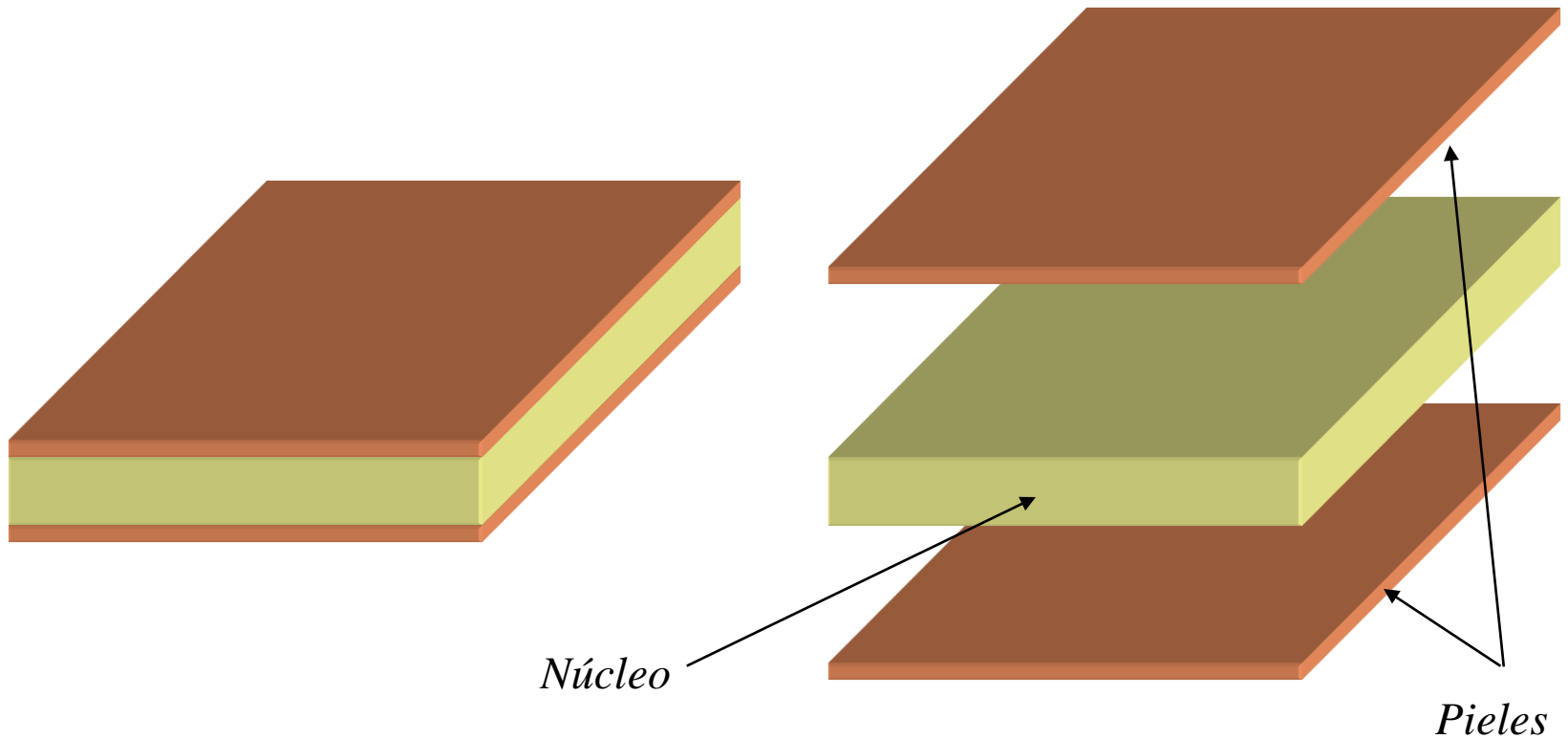


Matrices termoplásticas

Policarbonato

- Temperatura de trabajo hasta 135°C
- Resistente al impacto
- Transparencia
- Buena resistencia química (salvo a los alcális)
- Buena estabilidad dimensional
- Muy buenas propiedades mecánicas y tenacidad

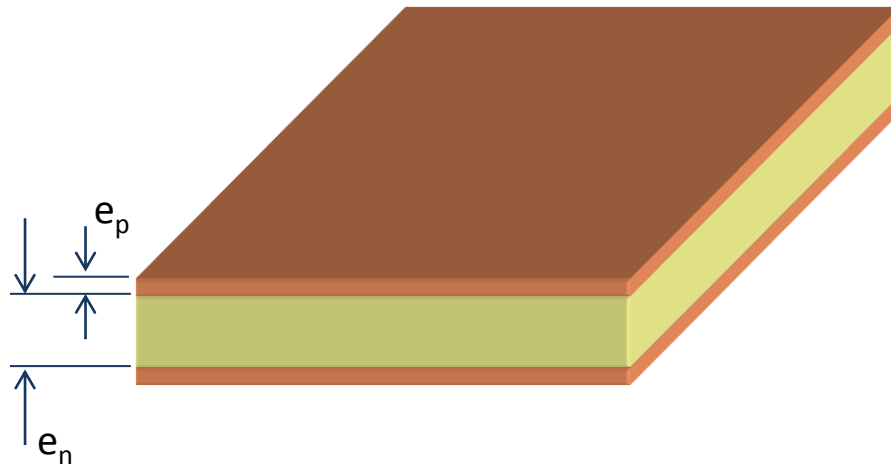
Definición



Núcleo

Pieles

Parámetros



Geometría pieles y núcleo

$$10 \leq \frac{e_n}{e_p} \leq 100$$

$$0.25 \text{ mm} \leq e_p \leq 12.7 \text{ mm}$$

Densidad del núcleo

$$20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \leq \gamma_n \leq 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Espesor capa de adhesivo

$$0.025 \text{ mm} \leq e_a \leq 0.2 \text{ mm}$$

Características positivas

◆ Ligereza



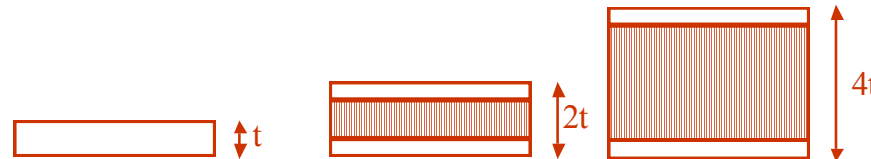
Cúpula de San Pedro del Vaticano

Piedra: 2600 kg/m²

Material sándwich: 33 kg/m²
(acero/espuma de Poliuretano)

Características positivas

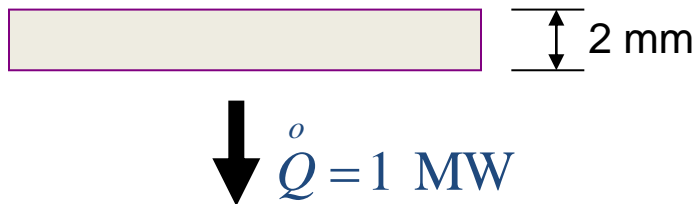
- ◆ Elevada rigidez y resistencia a esfuerzos de flexión



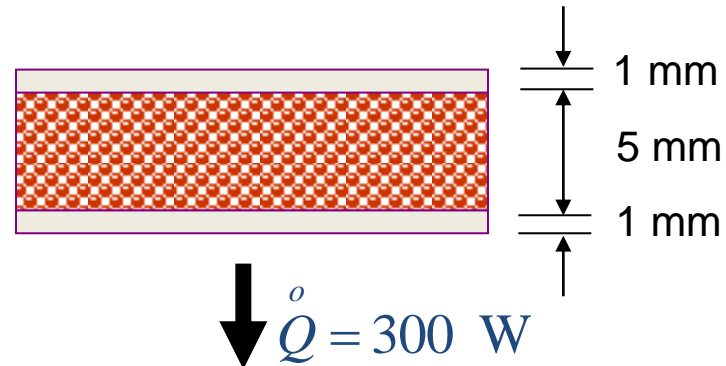
Espesor núcleo	0	t	3·t
Rigidez flexión	1	7	37
Resistencia	1	3,5	9,25
Peso	1	1,03	1,06

Características positivas

♦ Alta capacidad de aislamiento térmico



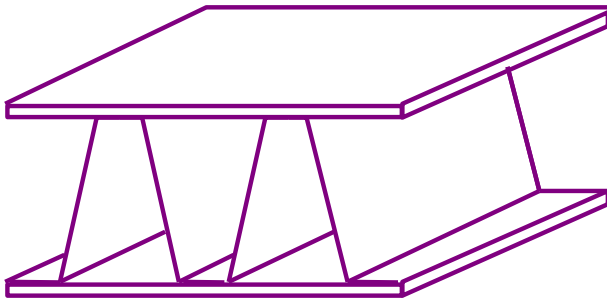
Metal: $k = 100 \frac{W}{m^{\circ}C}$



Piel: $k = 100 \frac{W}{m^{\circ}C}$

Núcleo de PUR: $k = 0,07 \frac{W}{m^{\circ}C}$

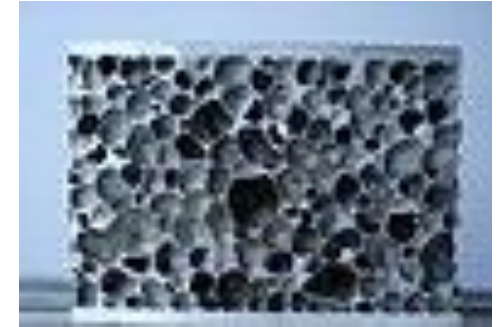
Tipos de núcleos



Panel coarrugado

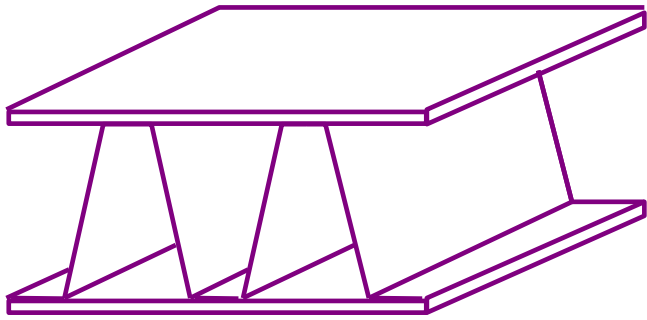


Nido de abeja



Espumas

Tipos de núcleos



Panel coarrugado

Pieles

Metales
Laminados

Núcleos

Metales
Materiales laminados

Tipos de núcleos



Nido de abeja

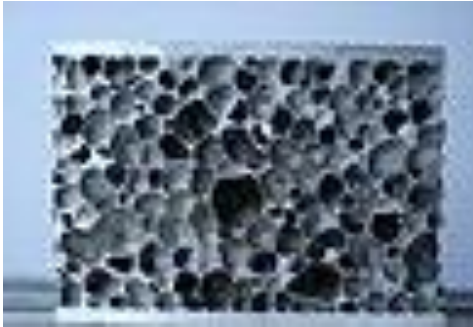
Pieles

Metales
Laminados

Núcleos

Aleaciones de aluminio (Al5052, Al5056, Al2024)
Nomex[®] (Fibra de aramida/resina fenólica)
Cartón Kraft (laminado de cartón/resina fenólica)
Carbono-epoxi
Kevlar-epoxi

Tipos de núcleos



Espumas

Pieles

Metales
Laminados
Contrachapados
Amianto/cemento

Núcleos

Resina fenólica
Poliuretano
PVC
Espumas metálicas

