



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 5. Efectos del entorno

Curso 2010/2011



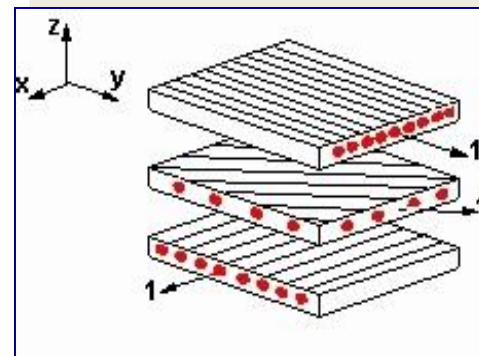
Tema 5. Efectos del entorno sobre el comportamiento mecánico

ÍNDICE

- Efectos higrotérmicos
- Otros efectos
- Comportamiento frente al fuego
- Corrosión

Un material compuesto puede verse expuesto a:

- Aire húmedo
- Elevada temperatura
- Temperaturas bajas
- Radiación solar
- Ataque químico
- Rayos
- Entorno espacial

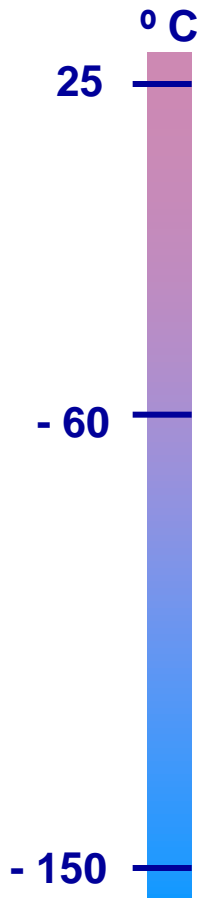


**El comportamiento
mecánico se ve
modificado**



Existen diversos factores que influyen en la modificación del comportamiento mecánico

- **Variación de las propiedades mecánicas de los constituyentes**
- **Pérdida de adherencia fibra-matriz**
- **Aparición de tensiones asociadas a las diferencias de propiedades**



Avión en vuelo

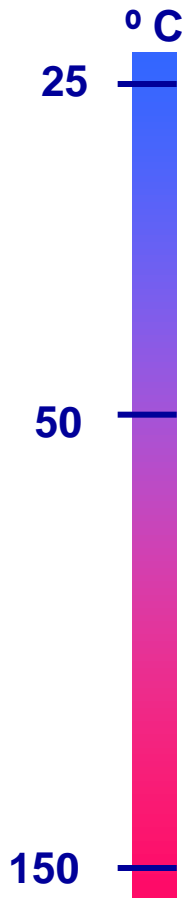


Vehículo espacial



Tanque criogénico

Efectos higrotérmicos



Fan

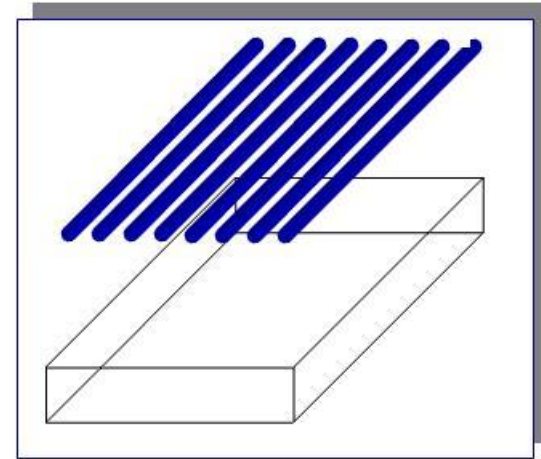


Motor cohete

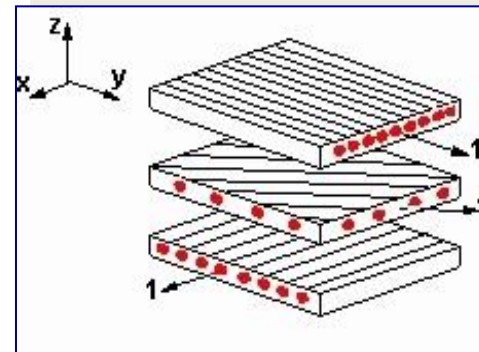


Conducciones

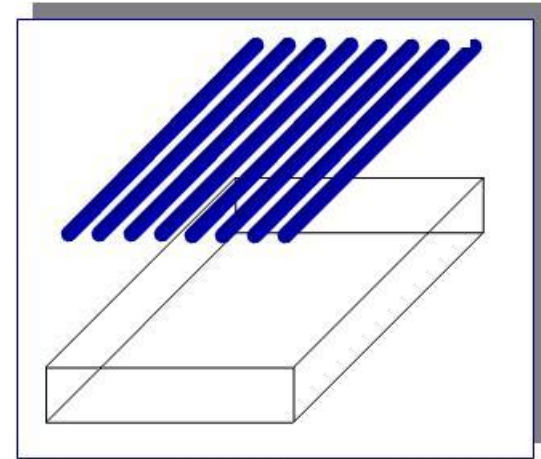
**Variación de propiedades
mecánicas de los
constituyentes**



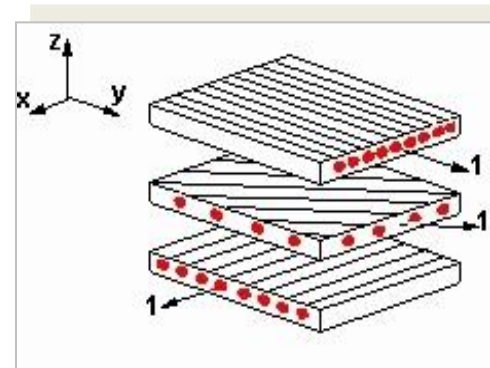
**Aparición de tensiones
interlaminares**



**Variación de propiedades
mecánicas de los
constituyentes**



**Aparición de tensiones
interlaminares**





Efectos de la humedad

Ganancia de peso

- Tipo de matriz y fibra
- Tiempo
- Geometría del componente
- Temperatura
- Humedad relativa
- Condiciones de exposición

Efectos de la humedad

Ganancia de peso

- Tipo de matriz y fibra
- Tiempo
- Geometría del componente
- Temperatura
- Humedad relativa
- Condiciones de exposición

Las matrices poliméricas absorben humedad hasta que se alcanza el punto de saturación

Matrices termoestables: 1% – 2%

Matrices termoplásticas: 0,1% - 0,3%

Las matrices absorben humedad cuanto mayor de la temperatura



Efectos de la humedad

- **Hinchazón de la matriz**
- **Disminución de la Tg de la resina**
- **Deslaminación del material**
- **Formación de ampollas superficiales**
- **Degradación química**



Efectos de la humedad

- **Hinchazón de la matriz**
- **Disminución de la Tg de la resina**
- **Deslaminación del material**
- **Formación de ampollas superficiales**
- **Degradación química**

Ambientes húmedos y cálidos originan un aumento en la ductilidad de la matriz.

Ambientes secos y fríos aumentan la fragilidad de la matriz

Ciclos alternos de condiciones húmedas y secas originan pérdidas de rigidez en uniones mecánicas



Efectos de la humedad en las propiedades

Laminados unidireccionales en dirección longitudinal y cuasiisótropos

Resistencia mecánica

< 1% de humedad. No se modifica

> 1% de humedad. Se reduce

Módulo de elasticidad

No se modifica ($-40^{\circ}\text{C} < T < 230^{\circ}\text{C}$)

Laminados unidireccionales en dirección transversal

Resistencia mecánica y módulo de elasticidad
decrece significativamente con la humedad

Efectos de la humedad en las propiedades

Laminados unidireccionales en dirección longitudinal y cuasiisótropos

Resistencia mecánica

$$-40^{\circ}\text{C} < T < 190^{\circ}\text{C}$$

No se modifica

$$190^{\circ}\text{C} < T$$

Se produce una disminución

Módulo de elasticidad

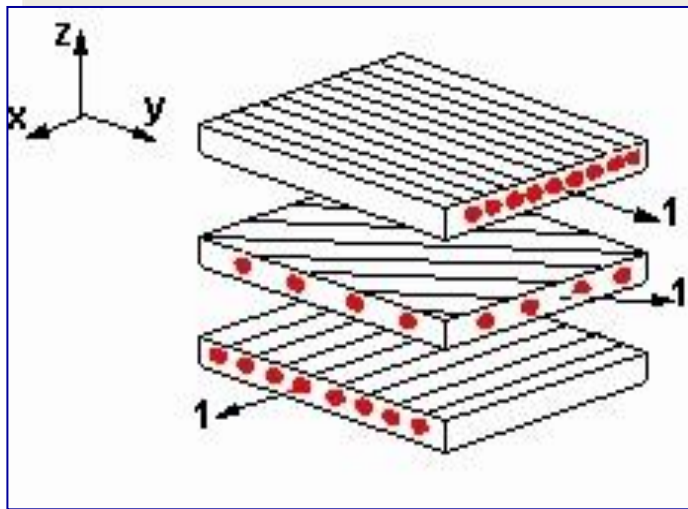
$$-40^{\circ}\text{C} < T < 230^{\circ}\text{C}$$

No se modifica

Laminados unidireccionales en dirección transversal

Resistencia mecánica y módulo de elasticidad se reduce significativamente cuando la temperatura aumenta de -40°C y 230°C

Tensiones de origen térmico



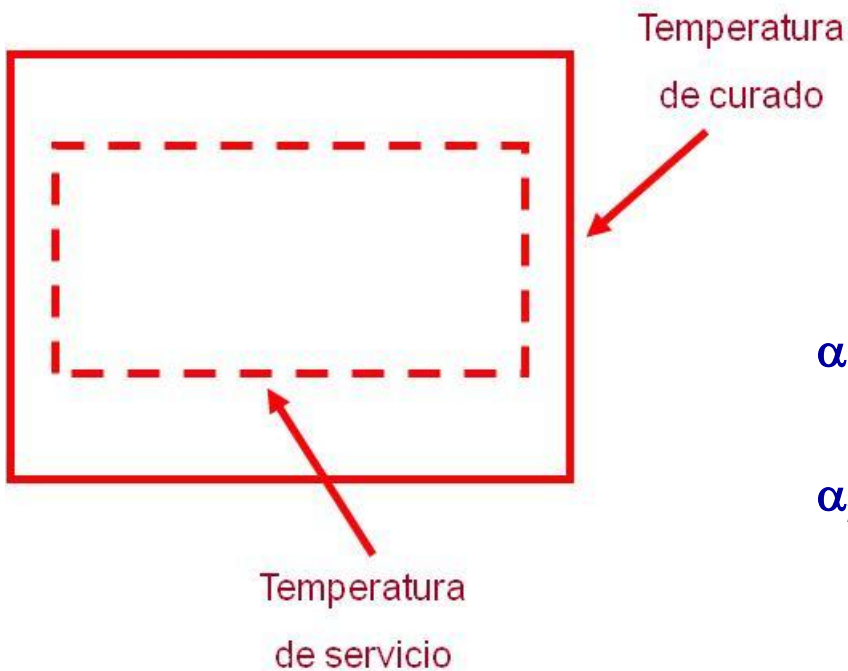
Están asociadas a las diferencias en los coeficientes de dilatación (térmica y de humedad):

- Entre fibra y matriz
- Entre láminas adyacentes con diferente orientación

Micromecánica

Teoría del laminado

Deformación de origen térmico



$$\varepsilon_1 = \alpha_1 \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_2 = \alpha_2 \cdot \Delta T$$

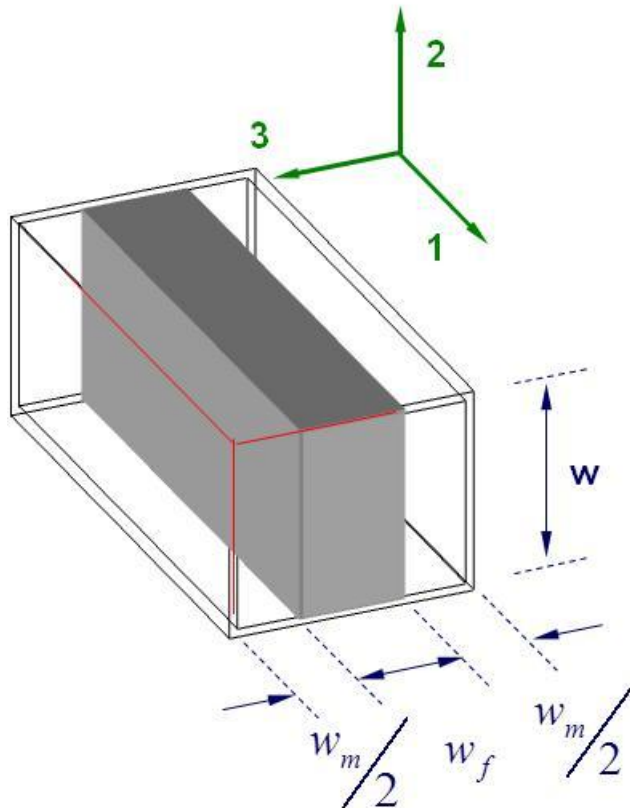
$$\gamma_{12} = 0$$

$\alpha_1 =$ Coeficiente de dilatación en dirección de las fibras

$\alpha_2 =$ Coeficiente de dilatación en dirección transversal a las fibras

$\Delta T =$ Diferencia de temperaturas entre la de servicio y la de curado

Coeficiente de dilatación en dirección de las fibras



En general $\alpha_f \ll \alpha_m$



Aparecen tensiones
en el material



Coeficiente de dilatación en dirección de las fibras



$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} + \alpha_f \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} + \alpha_m \cdot \Delta T$$

$$F_f = P$$

$$F_m = -P$$

$$F_f + F_m = 0$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} \quad \sigma_m = \frac{F_m}{A_m}$$

$$V_f \cdot \sigma_f + V_m \cdot \sigma_m = 0$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1 = \alpha_1 \cdot \Delta T$$

Coeficiente de dilatación en dirección de las fibras

$$\sigma_m = -\frac{(\alpha_m - \alpha_f) \cdot \Delta T}{\frac{1}{E_m} + \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{1}{E_f}}$$
$$\sigma_f = \frac{(\alpha_m - \alpha_f) \cdot \Delta T}{\frac{1}{E_m} + \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{1}{E_f}} \cdot \frac{V_m}{V_f}$$

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_f \cdot E_f \cdot V_f + \alpha_m \cdot E_m \cdot V_m}{E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m}$$

Coeficiente de dilatación en dirección transversal

La deformación transversal cumple la regla de las mezclas

$$\varepsilon_2 = V_f \cdot \varepsilon_{2_f} + V_m \cdot \varepsilon_{2_m}$$

$$\varepsilon_2 = \alpha_2 \cdot \Delta T$$

Deformación
mecánica

Deformación
térmica

$$\varepsilon_{2_f} = -\nu_f \cdot \varepsilon_{1_f}^{mec} + \alpha_f \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_{2_m} = -\nu_m \cdot \varepsilon_{1_m}^{mec} + \alpha_m \cdot \Delta T$$

Coeficiente de dilatación en dirección transversal

$$\varepsilon_{2_f} = -\nu_f \cdot \frac{\sigma_f}{E_f} + \alpha_f \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_{2_m} = -\nu_m \cdot \frac{\sigma_m}{E_m} + \alpha_m \cdot \Delta T$$

$$\alpha_2 = \alpha_m \cdot V_m + \alpha_f \cdot V_f + \frac{V_f \cdot E_m - V_m \cdot E_f}{\frac{E_m}{V_f} + \frac{E_f}{V_m}} \cdot (\alpha_f - \alpha_m)$$

Deformación en la lámina debida a la temperatura

Deformaciones en ejes lámina

$$\left\{ \varepsilon \right\} = \left\{ \varepsilon^m \right\} + \left\{ \varepsilon^T \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_1^m + \alpha_1 \cdot \Delta T \\ \varepsilon_2^m + \alpha_2 \cdot \Delta T \\ \gamma_{12}^m \end{array} \right\}$$

Deformaciones en ejes globales

$$\left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{array} \right\} = [R^{-1}] \cdot [T] \cdot [R] \cdot \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{array} \right\} \quad \left\{ \varepsilon^T \right\} = [R^{-1}] \cdot [T^T] \cdot [R] \cdot \left\{ \begin{array}{c} \alpha_1 \cdot \Delta T \\ \alpha_2 \cdot \Delta T \\ 0 \end{array} \right\}$$

Deformación en la lámina debida a la temperatura

Deformaciones en ejes globales

$$\left\{ \varepsilon^T \right\} = \left[R^{-1} \right] \cdot \left[T^T \right] \cdot \left[R \right] \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_1 \cdot \Delta T \\ \alpha_2 \cdot \Delta T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \left\{ \varepsilon^T \right\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{Bmatrix} = \Delta T \cdot \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix} = \Delta T \cdot \left\{ \bar{\alpha} \right\}$$

**Coefficientes de
dilatación
aparentes**

$$\left\{ \varepsilon \right\} = \left\{ \varepsilon^m \right\} + \left\{ \varepsilon^T \right\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^m + \alpha_x \cdot \Delta T \\ \varepsilon_y^m + \alpha_y \cdot \Delta T \\ \gamma_{xy}^m + \alpha_{xy} \cdot \Delta T \end{Bmatrix}$$

Relación tensión-deformación

En ejes locales

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \{\varepsilon^m\}$$

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \left(\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^T\} \right)$$

$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 - \alpha_1 \cdot \Delta T \\ \varepsilon_2 - \alpha_2 \cdot \Delta T \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

En ejes globales

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \cdot \{\varepsilon^m\}$$

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \cdot \left(\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^T\} \right)$$

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x \cdot \Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y \cdot \Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy} \cdot \Delta T \end{Bmatrix}$$

Rigidez plana de laminados simétricos

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \cdot (\{\varepsilon^o\} - \{\varepsilon^T\})$$
$$\{N\} = \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma\} \cdot dz$$
$$\{N\} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot dz \right) \cdot \{\varepsilon^o\} - \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot \{\bar{\alpha}\} \cdot dz \right) \cdot \Delta T$$

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon^o\} - \{N^T\}$$

Rigidez plana de laminados simétricos

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon^o\} - \{N^T\}$$

$$[A] = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot dz \right)$$

$$\{N^T\} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot \{\bar{\alpha}\} \cdot dz \right) \cdot \Delta T$$

$$[A] = \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot h_i$$

$$\{N^T\} = \Delta T \cdot \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot \{\bar{\alpha}\}_i \cdot h_i$$

Rigidez a flexión de laminados simétricos

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}] \cdot (z \cdot \{k\} - \{\varepsilon^T\})$$

$$\{M\} = \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma\} \cdot z \cdot dz$$

$$\{M\} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot z^2 \cdot dz \right) \cdot \{k\} - \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot \{\bar{\alpha}\} \cdot z \cdot dz \right) \cdot \Delta T$$

$$\{M\} = [D] \cdot \{k\} - \{M^T\}$$

Rigidez a flexión de laminados simétricos

$$\{M\} = [D] \cdot \{k\} - \{M^T\}$$

$$[D] = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot z^2 \cdot dz \right)$$

$$\{M^T\} = \left(\int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}] \cdot \{\bar{\alpha}\} \cdot z \cdot dz \right) \cdot \Delta T$$

$$[D] = \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot \left(\frac{z_i^3 - z_{i-1}^3}{3} \right)$$

$$\{M^T\} = \Delta T \cdot \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot \{\bar{\alpha}\}_i \cdot \left(\frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2} \right)$$

Rigidez de laminados no simétricos

$$\{\varepsilon^m\} = \{\varepsilon^o\} + z \cdot \{k\} - \Delta T \cdot \{\bar{\alpha}\}$$

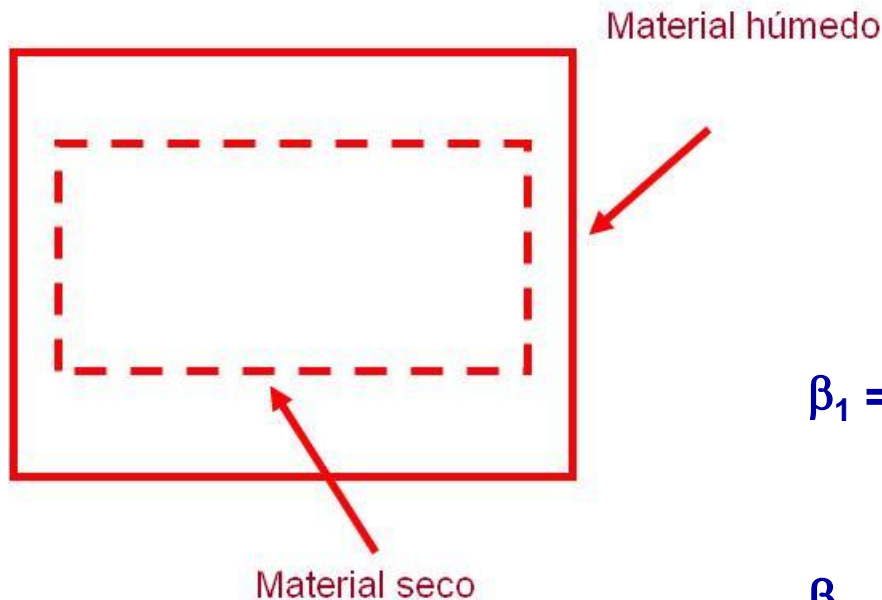


$$\{\sigma\} = [Q] \cdot \left(\{\varepsilon^o\} + z \cdot \{k\} - \{\varepsilon^T\} \right)$$

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon^o\} + [B] \cdot \{k\} - \{N^T\}$$

$$\{M\} = [B] \cdot \{\varepsilon^o\} + [D] \cdot \{k\} - \{M^T\}$$

Deformación debida a la humedad



$$\varepsilon_1^H = \beta_1 \cdot c$$

$$\varepsilon_2^H = \beta_2 \cdot c$$

$$\gamma_{12}^H = 0$$

$\beta_1 =$ Coeficiente de expansión por efecto de la humedad en dirección 1

$\beta_2 =$ Coeficiente de expansión por efecto de la humedad en dirección 1

$c =$ Contenido de humedad

Deformación debida a la humedad

$$\{N\} = [A] \cdot \{\varepsilon^o\} + [B] \cdot \{k\} - \{N^H\}$$

$$\{M\} = [B] \cdot \{\varepsilon^o\} + [D] \cdot \{k\} - \{M^H\}$$

$$\{N^H\} = c \cdot \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot \{\bar{\beta}\}_i \cdot h_i$$

$$\{M^H\} = c \cdot \sum_{i=1}^N [\bar{Q}]_i \cdot \{\bar{\beta}\}_i \cdot \left(\frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2} \right)$$

Radiación solar

Efectos de la radiación IR y visible

- No tienen suficiente energía para romper enlaces
- Su único efecto es térmico

Efectos de la radiación UV

- Tienen suficiente energía para romper los enlaces e iniciar reacciones químicas
- Producen:
 - Pérdida de peso por rotura de la cadena del polímero
 - Aparece porosidad
 - Se generan esfuerzos internos

Radiación solar

FIBRAS

No le afectan las UV

- Carbono
- Vidrio
- Boro

Se ven afectadas por las UV

- Kevlar-29

MATRICES

Epoxi: Buen comportamiento

Poliéster: Pobre estabilidad con la radiación



Ester aromáticos
0,1%-1% mejoran
el
comportamiento

A los polimeros les afectan las UV más que a los metales o los
cerámicos

Efectos biológicos

Mecanismos de degradación de los polímeros

- **Ataque directo a la matriz**



Los microorganismos pueden producir ácidos o enzimas que destruyen el polímero

- **Formación de ampollas**



Aparecen deslaminaciones

- **Rotura por formación de depósitos calcáreos**



Se forman partículas de un material extraño en el interior del laminado

Rayos



Aluminio: Conductor

GFRP: Aislante

CFRP: Mal conductor

Las estructuras de material compuesto deben protegerse del efecto de los rayos

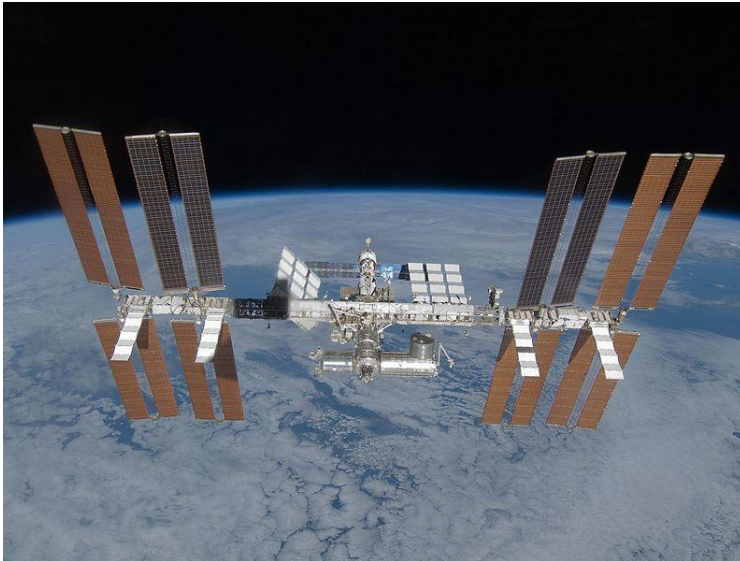
Rayos

Sistemas de protección



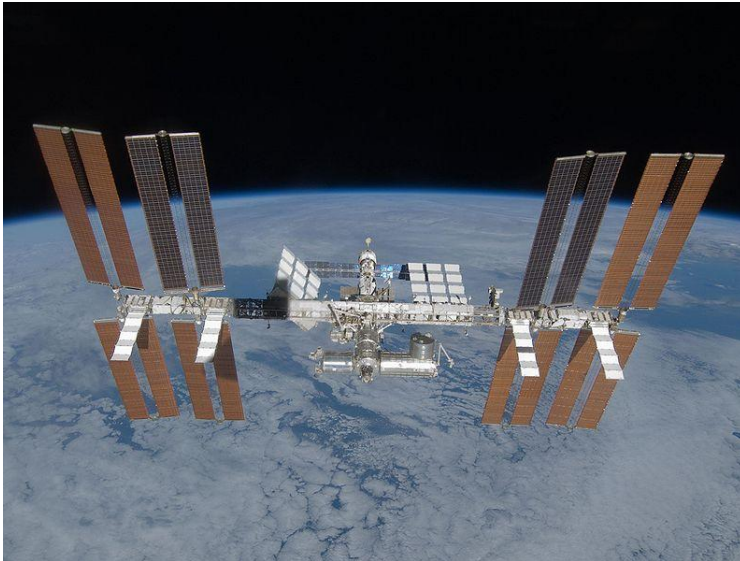
- Malla de aluminio
- Capa de aluminio
- Fibras recubiertas de níquel
- Fibras metálicas embebidas en el material
- Pinturas conductoras
- Barras conductoras
- Polimeros conductores

Entorno espacial



- Choque térmico
- Reacción con oxígeno atómico
- Impacto
- Desgasificación
- Radiación

Entorno espacial



Desgasificación

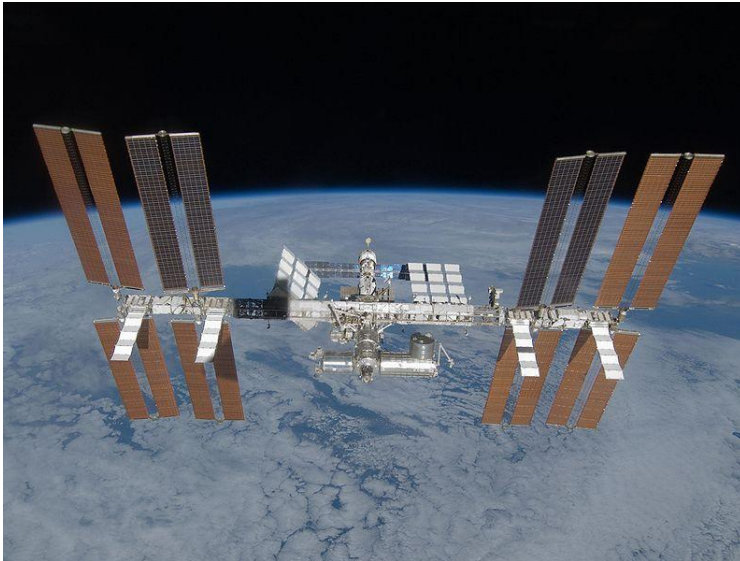
Componentes volátiles en la resina:

- Platificantes
- Elementos residuales de la polimerización
- Agua absorbida



Se debe desgasificar previamente el material

Entorno espacial



Radiación

Fenólica

Epoxi

Poliéster



**Estabilidad
decreciente**



Aspectos a considerar

- Crecimiento del fuego
- Toxicidad de los gases generados
- Resistencia residual e integridad estructural
- Extinción de la llama

Degradación
de la matriz

Degradación de
la entrecara

Degradación
de las fibras



Se comienzan a degradar las propiedades controladas por la matriz:

- Resistencia mecánica a compresión
- Resistencia a cortadura interlaminar

Se pueden utilizar para detectar la degradación térmica

Factores que controlan el comportamiento frente al fuego

- Tipo de matriz
- Tipo de fibra
- Volumen de fibra
- Distribución de fibras
- Contenido de aditivos retardantes

El factor dominante en la matriz





Protección frente al fuego

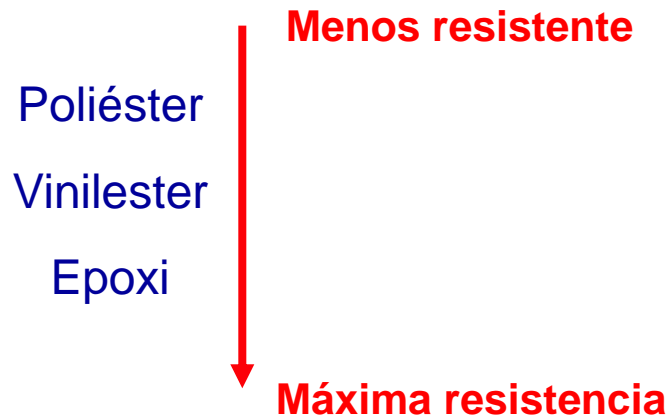
Los materiales compuestos de matriz polimérica no pueden cumplir los requerimientos sobre comportamiento frente a fuego

- Resinas intumescentes
 - Resinas retardadoras de la llama
 - Mantas de vidrio
 - Tejidos cerámicos
 - Espumas fenólicas
- Aditivos ignífugos
 - Hidróxidos de aluminio
 - Óxidos de antimonio

Corrosión química

Los materiales compuestos de matriz polimérica presentan un mejor comportamiento frente a la corrosión que los metales

El factor dominante en la matriz



Corrosión galvánica

Se produce cuando dos materiales con un potencial electroquímico muy diferente entran en contacto en presencia de humedad

El material que se corroe destructivamente es el más catódico

Aparece en uniones mecánicas metal- Material compuesto

Corrosión galvánica

**Este problema
aparece en las
uniones mecánicas
de CFRPs**

- Anódicos**
- Aleaciones de Mg
 - Aleaciones de Al-Mg 5000
 - Aleaciones de Al-Zn 7000
 - Al puro
 - Cadmio
 - Aleaciones de Al-Cu-Mg 2000
 - Acero y Fe
 - Bronce y latón
 - Aceros inoxidable
 - Titanio
 - Niquel y aleaciones
- Catódicos**
- Carbono

Mayor tendencia a la corrosión

Corrosión galvánica



- **Aislamiento de las superficies de contacto**
- **Pinturas aislantes**
- **Anodizado del elemento metálico**
- **Utilización de aceros resistentes a la corrosión o de aleaciones de titanio**