

CAPÍTULO 3

ASPECTOS MICROMECHANICOS DE LA ROTURA DE MATERIALES COMPUESTOS

En la aproximación micromecánica de la rotura de una lámina nos concentraremos al mismo nivel que consideramos anteriormente al plantear los aspectos micromecánicos de una lámina; es decir: consideraremos, nuevamente, las propiedades de rotura de las fibras y de la matriz, y obtendremos expresiones que nos permitan, en función de los parámetros anteriores, obtener unas tensiones de rotura de la lámina. Para ellos vamos a considerar varios casos de sollicitación de la misma.

3.1. TRACCIÓN DE LA LÁMINA EN LA DIRECCIÓN DE SUS FIBRAS

En este caso, si empleamos la terminología que ya utilizamos cuando hablamos del comportamiento micromecánico de la lámina, podemos poner:

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad [3.1]$$

donde σ_1 , es la tensión media que actúa sobre la lámina en la dirección de sus fibras, σ_f, σ_m , las tensiones que, respectivamente, soportan las fibras y la matriz, y V_f, V_m , los volúmenes específicos de fibra y matriz.

Llegados aquí, tenemos que realizar dos hipótesis diferentes: a) que la fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz; o b) viceversa. Supongamos que se cumple la primera hipótesis: $\varepsilon_f^R < \varepsilon_m^R$, siendo ε_f^R y ε_m^R , las deformaciones de rotura en tracción de fibra y matriz, respectivamente. Si admitimos -como ya hicimos con anterioridad, que fibra y matriz trabajan solidariamente -es decir, que sufren ambas la misma deformación-, romperá antes la fibra que la matriz, tal como se ve en la figura siguiente:

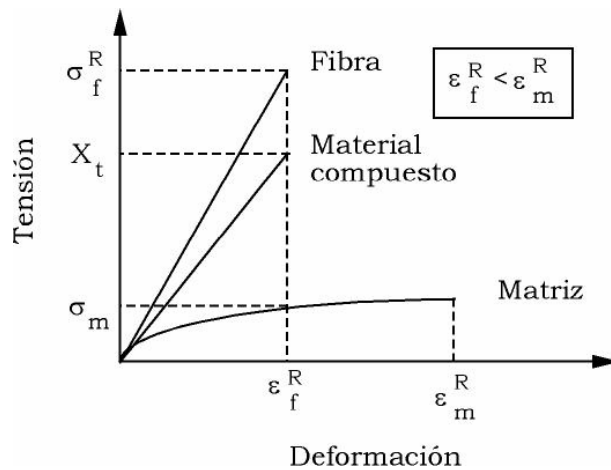


Figura 3.1.

en la que σ_f^R y σ_1^R , representan las tensiones de rotura de la fibra y de la lámina, respectivamente, y donde σ_m representa la tensión a la que se encuentra la matriz en el momento de la rotura y que es inferior a su tensión de rotura.

En estas condiciones podemos escribir:

$$\sigma_1^R = \sigma_f^R V_f + \sigma_m V_m = \sigma_f^R V_f + E_m \varepsilon_f^R V_m = \sigma_f^R V_f + E_m \frac{\sigma_f^R}{E_f} V_m = \sigma_f^R \left[V_f + \frac{E_m}{E_f} V_m \right] \quad [3.2]$$

Si, como suele ser habitual, $E_f \gg E_m$, la expresión anterior puede reducirse a:

$$\sigma_1^R = \sigma_f^R V_f \quad [3.3]$$

expresión muy sencilla y de gran uso en la práctica ingenieril.

En la siguiente figura se muestran las variaciones, en función del porcentaje de fibras V_f , de la resistencia a tracción de la lámina en las dos hipótesis anteriores (volúmenes específicos de fibra bajo y alto). Como se observa, existe un valor de V_f para el que ambas predicciones coinciden, y que señalaría la transición para aplicar una fórmula u otra. Las dos líneas

continuas de dicha figura representan los valores de la tensión de rotura a tracción de la lámina que poseen sentido físico. Así, cuando el volumen específico de fibras es nulo, la resistencia de la lámina debe coincidir con la de la matriz y, por el contrario, cuando dicho volumen toma el valor unitario, debe coincidir con el valor de la resistencia a tracción de las fibras. También se observa que el valor de la resistencia de la lámina, para el volumen crítico de fibras resulta ser inferior a la resistencia del material de la matriz, y que existe un valor del volumen de fibras $V_f = V_1$, para el que la resistencia de la lámina, a pesar de la existencia de fibras, coincide con el de la matriz.

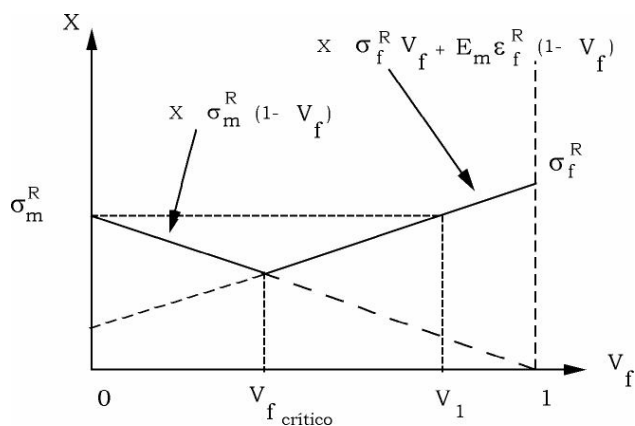


Figura 3.2.

Para el otro caso (deformación de rotura de la matriz sea inferior a la de la fibra, $\epsilon_m^R < \epsilon_f^R$) las curvas tensión-deformación de los materiales intervinientes serían las que se recogen a continuación:

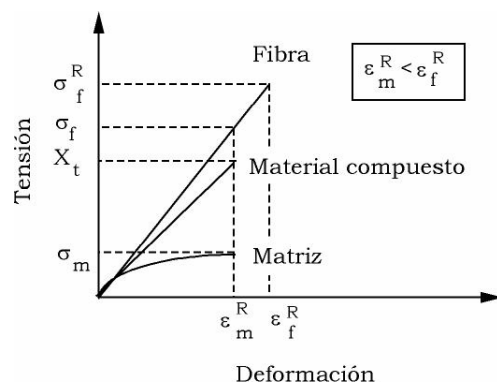


Figura 3.3.

Un razonamiento análogo -que se deja para que lo realice el lector- nos conduciría a la siguiente expresión:

$$\sigma_1^R = \sigma_f V_f + \sigma_m^R V_m = \sigma_m^R \left[V_f \frac{E_f}{E_m} + V_m \right] \quad [3.4]$$

Todos los resultados anteriores no tienen en consideración la distribución estadística de las resistencias a la tracción de fibra y matriz. Así, por ejemplo, para el caso de que la rotura se inicie en las fibras y no en la matriz, la resistencia de una fibra varía de un punto a otro de la misma, no produciéndose la rotura de todas las fibras al mismo tiempo sino que la lámina comienza a romperse en un punto débil de una fibra. La rotura de ésta hace cambiar la distribución de tensiones a la que se encuentra sometida la fibra que ha roto así como la de las fibras próximas, tal como se indica en la figura, en la que se representa las distribuciones de las tensiones normales, σ , que actúan sobre la sección transversal de la fibra, y de las tangenciales, τ , que actúan a lo largo de la interfase fibra- matriz.

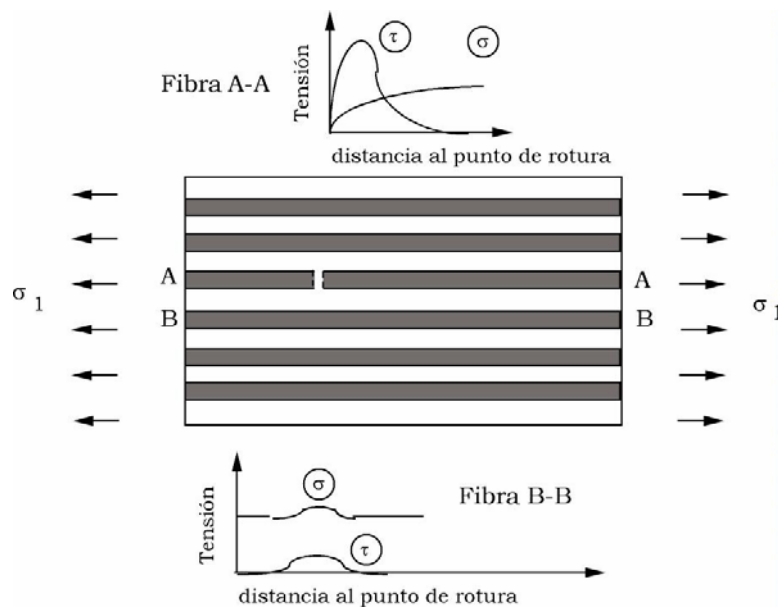


Figura 3.4.

Como se observa en la figura, en una fibra rota, las tensiones normales son nulas en la sección donde se produjo la rotura, y aumentan progresivamente a medida que nos alejamos de dicha sección hasta

alcanzar el valor de la tensión a la que se encuentran sometidas todas las fibras dentro de la lámina, σ_f . También aparecen tensiones tangenciales, actuando sobre la superficie lateral de la fibra, que crecen bruscamente en las proximidades de la sección rota para luego decrecer y anularse justo en el punto en el que la tensión de la fibra alcanza el valor σ_f . En una fibra vecina a la anterior, las tensiones normales se incrementan en la zona de rotura, pasando del valor σ_f a otro mayor, y aparecen tensiones tangenciales que también alcanzan un valor máximo en la zona de rotura de la fibra que rompió. El efecto global de todo esto es que, la fibra rota deja de soportar tensiones en una determinada longitud, sobrecargándose las fibras vecinas, las cuales podrían alcanzar niveles tensionales que, también, las condujeran a la rotura. En la figura siguiente se muestran diferentes etapas del proceso de rotura a medida que la sollicitación de la lámina vaya aumentando.

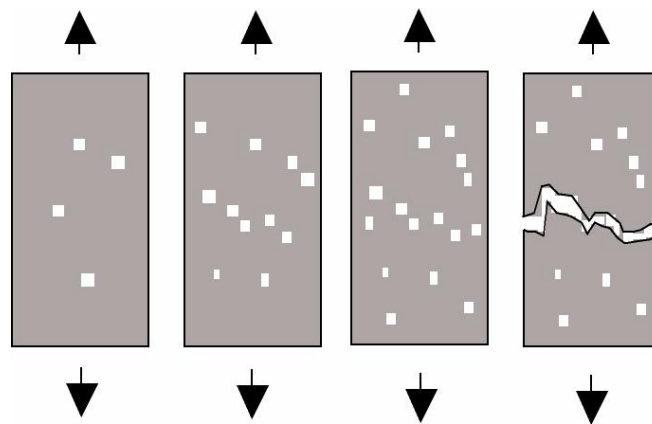


Figura 3.5.

Como se observa en la figura, a medida que la carga aumenta, se incrementa la densidad de fibras rotas que, a su vez interaccionan con las vecinas causando también su fallo. En un momento dado, las roturas generadas pueden coalescer (unirse), produciéndose, entonces, la rotura global de la lámina. Conviene remarcar el hecho de que las fibras no tienen, estrictamente hablando, una tensión de rotura sino que ésta sigue una determinada distribución probabilística. Este hecho implica que, para calcular la tensión de rotura de la lámina, fuera necesario un análisis estadístico en función del volumen específico de fibras y de la distribución estadística de la tensión de rotura de éstas.

Para el caso de materiales compuestos en los que la matriz sea más frágil que las fibras que la refuerzan, como es el caso de los materiales compuestos de matriz cerámica, podríamos repetir todo lo dicho con anterioridad pero ahora las fisuras se originarían en zonas débiles de la matriz. En esas zonas, las fibras se verían sometidas a mayores tensiones normales y aparecerían tensiones tangenciales sobre las fibras a lo largo de su interfase con la matriz. Esto puede conducir, a su vez, a que las fibras rompan o que se separen de la matriz ("Fibre-matrix debonding" en inglés).

3.2. COMPRESIÓN DE LA LÁMINA EN LA DIRECCIÓN DE SUS FIBRAS

Bajo condiciones de compresión, la lámina falla por micropandeo de sus fibras, tal como se indica en la figura, en la que se muestran las dos formas más comunes de fallo que aparecen en la lámina.

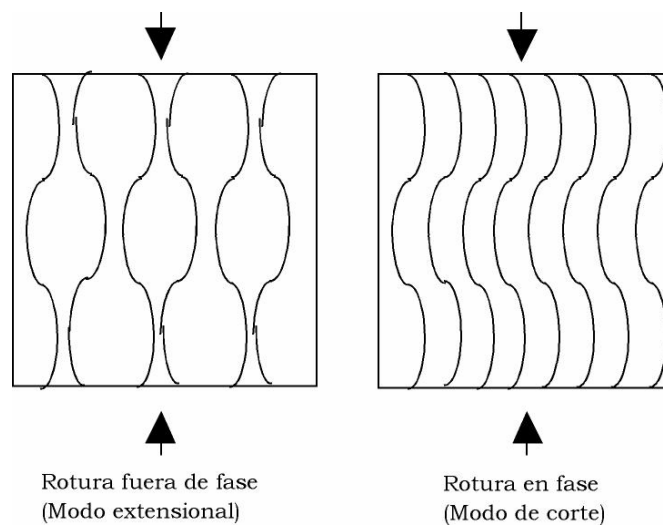


Figura 3.6.

Cuando el volumen específico de fibras es bajo, predomina en el interior de la lámina la primera forma de fallo (Modo extensional), pudiéndose expresar la resistencia de la lámina como:

$$\sigma_1 = 2V_f \sqrt{\frac{E_m E_f V_f}{3(1-V_f)}} \quad [3.5]$$

Para valores más altos de V_f , la segunda forma de rotura por compresión (Modo de corte) es la predominante y, en ese caso, la resistencia a la compresión de la lámina viene dada por:

$$\sigma_1 = \frac{G_m}{1-V_f} \quad [3.6]$$

Otro posible modo de fallo, que aparece con cierta frecuencia en láminas con un alto contenido de fibras, es aquel gobernado por el fallo a cortante de las propias fibras, tal como se aprecia en la siguiente figura:

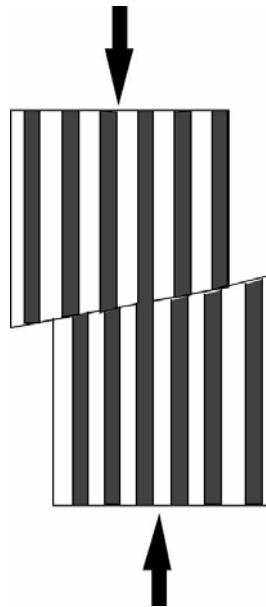


Figura 3.7.

La resistencia del laminado puede, entonces, expresarse como:

$$X_c = 2S^f \left[V_f + (1-V_f) \frac{E_m}{E_f} \right] \quad [3.7]$$

donde S^f es la resistencia al corte de las fibras.

3.3. TRACCIÓN DE LA LÁMINA EN SENTIDO TRANSVERSAL A SUS FIBRAS

Este modo de sollicitación puede ser el más crítico por la baja resistencia a tracción de la resina. Cuando actúan cargas en el sentido transversal de la lámina, aparece el fenómeno de concentración de tensiones en zonas de la matriz próximas a las fibras (interfase fibra/matriz). En la siguiente figura se muestra el efecto mencionado:

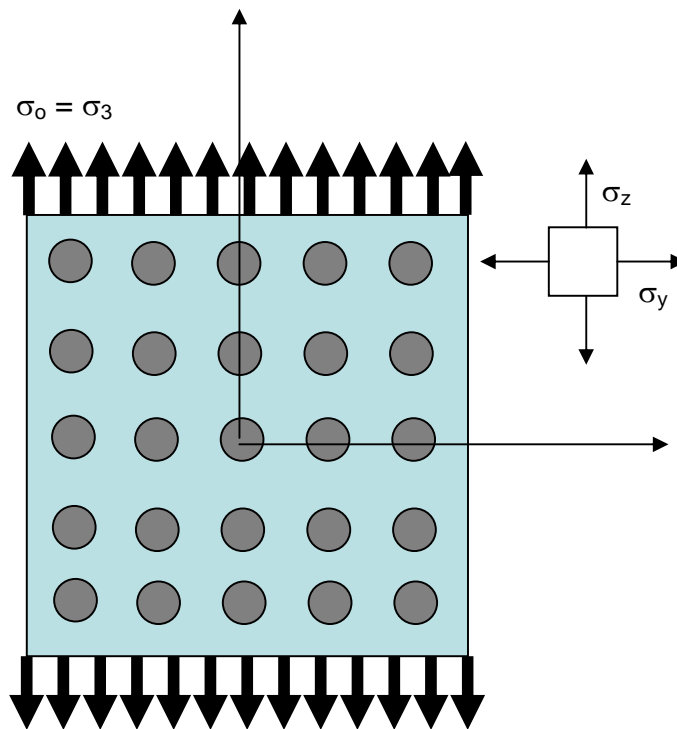


Figura 3.8.

El factor de concentración de tensiones, k_σ , definido como el cociente entre la máxima tensión que se produce en la matriz y la tensión externa aplicada a la lámina, toma unos valores que dependen del tipo de matriz y fibra utilizados. Así, por ejemplo, para un laminado carbono/epoxi, este coeficiente puede alcanzar valores próximos a 1.5 para un volumen de

fibra en torno al 80%. En el caso de laminados fibra de vidrio/epoxi y boro/epoxi, también para la misma proporción de refuerzo, dicho factor puede tomar, respectivamente, valores en torno a 2.3 y 2.7.

Otra posibilidad para el estudio de este tipo de rotura es considerar el factor de concentración de deformaciones, k_ε , que se relaciona con el factor de concentración de tensiones de la siguiente manera:

$$k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_2} = k_\sigma \left(\frac{E_2}{E_m} \right) \frac{(1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)}{1 - \nu_m} \quad [3.8]$$

En esta expresión se supone que la rigidez de las fibras es mucho más grande que la de la matriz. Así, por ejemplo, para un laminado de boro/epoxi, el factor de concentración de deformaciones, puede llegar a alcanzar valores de 16.0 para contenidos de fibra próximos al 80%, habiéndose observado que, dicho factor, crece considerablemente para un contenido de fibra superior al 50%.

Para predecir el fallo de una lámina transversalmente cargada, es necesario tener en cuenta las tensiones y deformaciones residuales debidas al proceso de curado, así como también las tensiones y deformaciones de origen térmico. Suponiendo un comportamiento elástico de los materiales intervinientes, la resistencia a tracción transversal, Y_t , puede expresarse como:

$$Y_t = \frac{1}{k_\sigma} (Y_t^m - \sigma_r^m) \quad [3.9]$$

si se aplica un criterio de tensión máxima, y:

$$Y_t = \frac{1 - \nu_m}{k_\sigma (1 + \nu_m)(1 - 2\nu_m)} (Y_t^m - \varepsilon_r^m E_m) \quad [3.10]$$

si se considerase un criterio de deformación máxima. En estas dos últimas expresiones, σ_r^m y ε_r^m son la tensión y deformación radial, respectivamente, de la matriz.

Las fórmulas anteriores predicen una rotura local, sin embargo, el fallo tiene lugar por la coalescencia de microfisuras generadas en la interfase fibra/matriz a medida que la carga aumenta, tal como se representa en la figura siguiente, en la que debe entenderse que, la carga va aumentando, progresivamente, desde la figura de arriba hasta la de abajo:

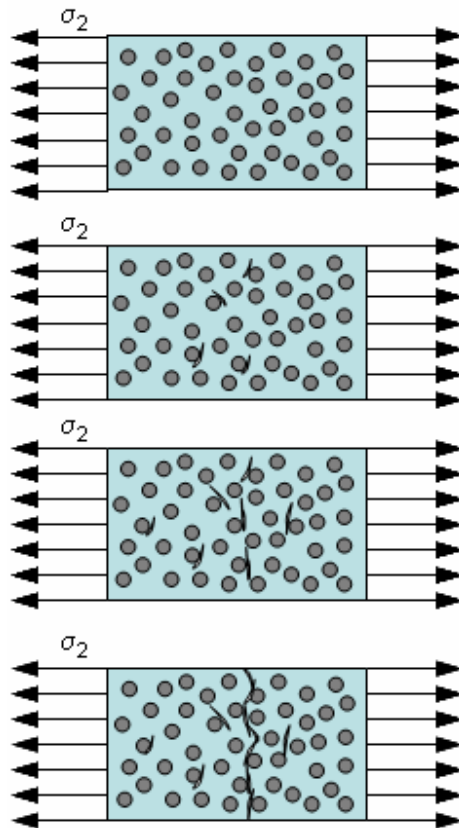


Figura 3.9.

3.4. COMPRESIÓN DE LA LÁMINA EN SENTIDO TRANSVERSAL A SUS FIBRAS

Existen varios mecanismos de fallo en estas circunstancias. Las altas concentraciones de tensiones que pueden producirse en la interfase fibra/matriz, pueden causar la rotura de esta última o el aplastamiento de la fibra. Si este fuera el mecanismo de fallo, la resistencia a compresión transversal, Y_c , vendría dada por:

$$Y_c = \frac{Y_c^m + \sigma_r^m}{k_\sigma} \quad [3.11]$$

donde Y_c^m es la resistencia a compresión de la matriz y σ_r^m es la tensión residual máxima radial en la interfase. Las altas tensiones de corte en la interfase pueden causar un fallo por cortante y/o el despegue fibra-matriz, conduciendo a una rotura catastrófica de la lámina por cortante.

3.5. ROTURA POR CORTANTE EN EL PLANO

En estas condiciones aparece una gran concentración de tensiones a lo largo de la interfase fibra/matriz. Estas tensiones pueden causar el fallo por cortante de la matriz y/o el despegue fibra-matriz. Si es el primero de estos mecanismos el que conduce a la rotura, la resistencia al corte en el plano del laminado, S , viene dada por:

$$S = \frac{S^m}{k_t} \quad [3.12]$$

donde S^m es la resistencia al corte del material de la matriz y k_t es el factor de concentración de tensiones tangenciales.