

FALLA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS

RESUMEN

Es difícil definir y predecir la falla de los compuestos laminados, ya que en éstos ocurren una serie de mecanismos de falla que son graduales, están interconectados y son difíciles de predecir. Este artículo discute los problemas inherentes en definir la "falla" de un compuesto laminado. Se revisan los criterios de falla utilizados más comúnmente en estos materiales y se analiza además la utilidad de estas teorías en su diseño. También, se presenta el estado actual de investigación sobre la falla de compuestos laminados. Se concluye que para estos materiales no existe una metodología de diseño satisfactoria.

PALABRAS CLAVES: Compuesto laminado, modos de falla, criterios de falla.

ABSTRACT

It is difficult to define and predict the failure of composite laminates, as a series of failure mechanisms that are gradual, interconnected and difficult to predict occurs in them. This article discusses the problems inherent in defining the "failure" of a composite laminate. The most commonly used failure criteria are reviewed; also their usefulness in the design of these materials is analyzed. Besides, the current state of the research on composite laminate failure is presented. It is concluded that there is no satisfactory design method for them.

KEYWORDS: Composite laminate, failure modes, failure criteria.

1. INTRODUCCIÓN

A través de la historia, el hombre ha sido inspirado por la naturaleza, y es en gran parte debido a ella que se han desarrollado nuevos conceptos tecnológicos, como los materiales compuestos. La guadua, que actualmente está de "moda" en la región, es un excelente ejemplo de esto. Es un material natural compuesto, conformado por una matriz polimérica reforzada con fibras de celulosa. Estas dos *fases* (fibras y matriz) están unidas mediante un material orgánico de bajo peso molecular.

Los *materiales compuestos* desarrollados por el hombre se asemejan a los compuestos naturales. Éstos son materiales conformados por dos o más materiales (fases) que se unen insolublemente de ciertas maneras y en proporciones adecuadas para formar un nuevo material con propiedades diferentes a las de ellos. Sólo los compuestos son diseñados para lograr mejores desempeños que los de los materiales convencionales.

Desafortunadamente, la complejidad de los mecanismos de falla y su interacción, entre otros factores, hacen que el proceso de diseño de estos materiales se torne incierto. Se han propuesto muchos criterios de falla de compuestos laminados, pero actualmente no existe una teoría que satisfaga todas las expectativas, y no hay un acuerdo acerca de cuáles teorías deben usarse en los diferentes casos.

En este artículo se discuten los problemas en definir la "falla" de un compuesto laminado, se revisan los criterios de falla utilizados más comúnmente en estos materiales y

LUZ STELLA ARIAS MAYA

Ingeniera Mecánica
Estudiante de Maestría
School of Engineering
University of Surrey
stellarias@hotmail.com

LIBARDO VANEGAS USECHE

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Profesor Asistente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
lvaneegas@utp.edu.co

se analiza además la utilidad de estas teorías en su diseño. La sección 2 presenta aspectos generales de los materiales compuestos. Luego se presentan las teorías de falla más comunes, se discute sobre su utilidad y se presenta el estado actual de investigación.

2. MATERIALES COMPUESTOS

Los *compuestos* son materiales conformados, en una escala macroscópica, por dos o más materiales insolubles el uno en el otro (llamados fases o constituyentes), los cuales se unen de maneras y en proporciones adecuadas, para formar un nuevo material con mejores propiedades a las de los constituyentes (metales, cerámicos y plásticos). Los compuestos aprovechan las propiedades de cada uno de éstos de tal manera que pueden lograrse combinaciones de propiedades que son difíciles de obtener en materiales convencionales. Por ejemplo, alta relación resistencia-densidad o rigidez-densidad. Un ejemplo clásico de material compuesto es el concreto reforzado, conformado por una matriz cerámica con partículas (de naturaleza silíceas), reforzada con varillas de acero, las cuales le conceden al compuesto resistencia a la tracción y tenacidad. La figura 1 esquematiza un par de materiales compuestos. Normalmente, la fase conocida como *fibra* es resistente y rígida, mientras que la fase base, la *matriz*, puede tener baja o alta resistencia o rigidez.

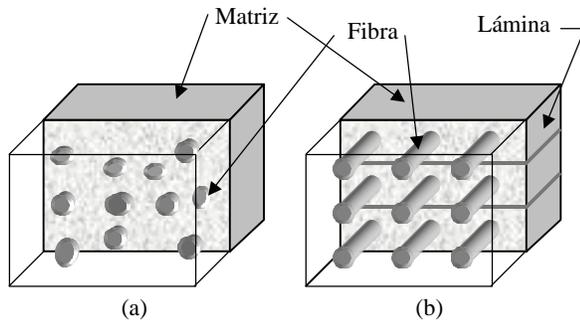


Figura 1. Materiales compuestos. (a) Compuesto reforzado con partículas. (b) Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección)

Las fibras de un material compuesto pueden ser largas y continuas, largas discontinuas o partículas (figura 1). Los compuestos reforzados con partículas pueden ser, por ejemplo, polímeros termoestables que se mezclan con *rellenos* (para hacerlos más económicos y mejorar sus propiedades) como fibra de vidrio, aserrín, carbonato de calcio y papel o tela rasgada, los cuales se agregan en cantidades hasta del 60% en peso.

Los compuestos reforzados con fibras largas tienen la ventaja de que el material de éstas adquiere una gran resistencia a la tracción al ser conformado en filamentos muy delgados, debido en parte a la reducción del número de defectos. Por ejemplo, un vidrio (*E-glass*) con resistencia a la tracción de 5 GPa, puede tener una resistencia de unos 70 GPa cuando está en forma de fibra [1]. Por lo tanto, en muchos casos las fibras son las que aportan la resistencia y rigidez al compuesto y son las encargadas de soportar las cargas. La forma, tamaño, orientación y distribución de la fase usada como refuerzo son aspectos claves para controlar las propiedades del compuesto. Por ejemplo, la resistencia y rigidez son mayores en la dirección de las fibras que en otras direcciones.

La matriz se encarga de sostener las fibras, de mantener la integridad del compuesto y de transferir las cargas entre las fibras, dando capacidad al compuesto de soportar diferentes sollicitaciones de carga (las fibras por sí solas sólo son capaces de soportar tracción). Además, la matriz protege a las fibras del ataque del medio. Muchas veces la matriz es de baja densidad (matriz polimérica por ejemplo), con lo que se obtiene un elemento de bajo peso. Otra función de la matriz es aislar las fibras para retardar el crecimiento de grietas, es decir, para aumentar la tenacidad del material. Si las fibras estuvieran en contacto, las grietas crecerían más fácilmente, por lo que el material sería frágil.

Es muy común que las fibras (largas y continuas) se embeban en la matriz en una dirección para formar una

lámina (ver figura 1(b)). Las láminas se apilan una sobre otra con las fibras orientadas en direcciones predeterminadas, de tal manera que las propiedades del compuesto en las distintas direcciones sean apropiadas para las cargas que tendrá que soportar en servicio. Este tipo de compuestos se denomina *laminado*.

De acuerdo al material de los constituyentes, los compuestos sintéticos se pueden clasificar en compuestos de matriz polimérica, de matriz metálica, de matriz cerámica, de carbono-carbono y algunas combinaciones de matrices y fibras, llamadas híbridos. Los de matriz polimérica son los más usados y son particularmente adecuados en aplicaciones que requieran alta relación entre la rigidez o la resistencia y la densidad, tales como las requeridas en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Los compuestos ofrecen versatilidad y flexibilidad, ya que en el diseño no sólo se tienen variables como material, forma y dimensiones, sino que se tiene la posibilidad de seleccionar muchísimas combinaciones de materiales, la configuración del compuesto y las características del proceso de manufactura. Los compuestos pueden tener alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de expansión térmica, alta resistencia a la fatiga, pueden ser aislantes térmicos y tener alta eficiencia estructural (bajo peso y costo). Las aplicaciones de estos materiales incluyen implementos deportivos y biomédicos, botes, vehículos y aviones entre muchas otras.

3. FALLA DE LOS COMPUESTOS LAMINADOS

3.1. Problemas inherentes en definir y predecir la falla de un compuesto laminado

La falla de un laminado es normalmente un proceso de degradación gradual en el que pueden ocurrir muchos modos de falla. El diseñador debería conocer muy bien cómo y cuándo ocurren estos mecanismos, con el fin de predecir correctamente la falla y diseñar elementos seguros. Sin embargo, es difícil predecir, y aún definir, con precisión la falla de un compuesto laminado, para lo cual es necesario reconocer claramente con qué nivel de degradación (*cuándo*) falla el compuesto, *cómo* se desarrolla el proceso y *dónde* se produce.

Uno de los problemas inherentes de los laminados es su diversidad de propiedades. Primero, las fases (fibras y matriz) tienen diferentes propiedades. Segundo, las láminas de un compuesto son anisotrópicas, ya que se generan diferentes propiedades en diferentes direcciones, dependiendo de cómo se construya el compuesto. Por esto, el número de parámetros de resistencia es bastante grande; como ejemplo se tienen la resistencia longitudinal y transversal en tracción y compresión, y la resistencia al esfuerzo cortante en las diferentes direcciones. Adicionalmente, la mayoría de las fibras

reales no tienen una resistencia uniforme, es decir, las resistencias de las fibras tienen diferencias significativas entre sí. Esto hace que el proceso de falla sea complejo ya que las fibras no fallan simultáneamente.

Como se acaba de mencionar, es necesario saber *cuándo* falla el compuesto, es decir, cuál es el nivel de degradación inaceptable. Para esto hay que tener en cuenta si la estructura está cumpliendo la función requerida. Es claro que la estructura ha fallado cuando se ha fracturado "totalmente", pero puede ocurrir que aunque ésta no haya fallado catastróficamente, los daños sean tan severos que ya no puede soportar las cargas de trabajo. Por otro lado, en algunos casos la estructura puede operar aceptablemente aún después de que hayan ocurrido fallas en algunas partes de los constituyentes del compuesto. Por ejemplo, cuando una lámina falla, no todo el laminado falla, y éste puede soportar todas las cargas de trabajo. Finalmente, cuando la estructura tiene una función decorativa, la falla podría definirse como una degradación de su apariencia, cuando se presentan grietas superficiales, una excesiva deflexión o una pérdida o fractura de una parte del elemento. Entonces, el nivel de degradación que debe asociarse con la falla depende de la aplicación y definirlo no es tarea fácil.

Además que *definir* la falla de un compuesto no es fácil, *describir* o *predecir* la falla es una tarea más compleja aún. El proceso de falla de un laminado consiste en una combinación de microfallas, cuya ocurrencia depende de muchos factores, tales como las propiedades de las fibras, de la matriz, de la interfase (fibra-matriz) y de la interfaz (entre láminas). El proceso de fractura ocurre en una amplia variedad de modos de falla, como la pérdida de adherencia entre fases (*debonding*), deslaminación, agrietamiento de la matriz, pandeo local de las fibras, rotura de fibras y extracción de las fibras (*fiber pullout*). Dependiendo de la longitud de las fibras, éstas podrían ser despegadas y extraídas de la matriz o primero fracturadas (para ser extraídas posteriormente). La deslaminación es la separación entre láminas y podría ser producida, por ejemplo, por esfuerzos cortantes o por el efecto de una grieta.

La ocurrencia de estos modos de falla depende de muchos factores. Algunos modos son provocados por la aparición de otros, y cada uno de éstos puede afectar el desarrollo de los demás. Los modos de falla se presentan también dependiendo del tipo de carga. Por ejemplo, la falla del laminado no es igual en tracción y en compresión. En tracción, las fibras fallan al ser quebradas, lo que puede conllevar a la fractura del laminado, mientras que en compresión la falla puede ocurrir por micropandeo. Debido a esto, la resistencia a la compresión es menor que la de tracción. También, fibras individuales pueden flectarse y producir falla en la matriz (de baja resistencia). La dirección de las cargas con respecto a la de las fibras también afecta el modo de falla. Cuando la

carga se aplica en una dirección transversal a las fibras, aparecen esfuerzos cortantes que tienden a generar grietas, separación de las láminas y que hacen que las fibras se desgaren de la matriz conduciendo a la falla. La resistencia de la lámina está muy influenciada por la orientación de las cargas con respecto a las fibras.

Otros problemas que aparecen cuando se trata de predecir la falla de un laminado es que en ésta intervienen aspectos como esfuerzos residuales térmicos (producidos durante el curado de matrices poliméricas), comportamiento no lineal y diferencias entre las propiedades de la lámina antes y después de ser embebida en el laminado. Hay que agregar que no es claro si en el cálculo de la falla es mejor utilizar las propiedades de los constituyentes o las propiedades de la lámina. Si, además, existen concentradores de esfuerzos como grietas y espacios en los constituyentes, la predicción y el proceso de falla se tornan más complejos, porque éstos pueden ser los que inicien la falla.

El problema principal en la determinación de la falla final de un laminado es tal vez que ésta no depende sólo de un modo de falla, ni de un número de modos de falla que interactúan, sino que también depende del modo que predomina en el proceso. Éste podría estar dominado por la fibra, por la matriz o por la interfase.

Como puede verse, la falla de compuestos de fibra reforzada es muy compleja. Todos los factores mencionados tienen influencia en el comportamiento del compuesto y deberían ser involucrados en la formulación del criterio de resistencia micromecánica. Sin embargo, no es fácil incorporar correctamente todos estos factores en el diseño de laminados.

3.2. Teorías de falla de láminas unidireccionales continuas

La falla de un laminado es un proceso gradual. Se espera que falle primero una lámina, con lo que la carga se redistribuye entre las otras láminas. El proceso continúa con las siguientes láminas hasta la destrucción total del laminado. Entonces, el diseño debe concentrarse inicialmente en la resistencia y falla de la primera lámina.

Existen muchos criterios para predecir el daño de una lámina. Casi todos éstos asumen homogeneidad y un comportamiento lineal esfuerzo-deformación hasta la falla. Estas teorías son adaptaciones de las existentes para materiales homogéneos e isotrópicos. Algunas de las teorías clásicas que han sido y siguen siendo más utilizadas son la teoría del esfuerzo máximo, la teoría de la deformación máxima, la teoría de falla Tsai-Hill y la teoría de falla Tsai-Wu.

La **teoría del esfuerzo máximo** predice que la falla ocurre cuando algún esfuerzo a lo largo de uno de los ejes principales del material es igual o mayor que la resistencia (experimental) correspondiente. La falla

ocurriría cuando al menos una de las siguientes ecuaciones se cumple:

$$\begin{aligned} s_1 &\geq F_{1t}, \text{ si } s_1 > 0 \quad \text{ó} \quad |s_1| \geq F_{1c}, \text{ si } s_1 < 0, \\ s_2 &\geq F_{2t}, \text{ si } s_2 > 0 \quad \text{ó} \quad |s_2| \geq F_{2c}, \text{ si } s_2 < 0, \\ |s_4| &\geq F_4, \quad |s_5| \geq F_5, \quad |s_6| \geq F_6, \end{aligned} \quad (1)$$

donde s_1 a s_6 son los esfuerzos normales o cortantes (en el punto crítico) (ver figura 2), F_{1t} y F_{1c} son las resistencias en tracción y compresión longitudinal, respectivamente, F_{2t} y F_{2c} son las resistencias en tracción y compresión transversal, respectivamente, F_4 y F_5 son las resistencias al cortante ínter-laminar (según la convención de esfuerzos de la figura 2) y F_6 es la resistencia al cortante en el plano. Note que las resistencias se toman siempre positivas.

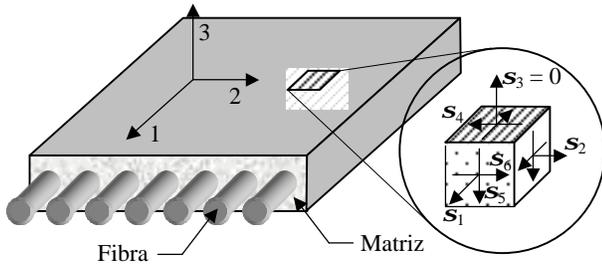


Figura 2. Lámina unidireccional. Ejes principales del material: 1 (longitudinal), 2 (transversal) y 3 (normal al plano de la lámina). Se muestra la convención de los subíndices de los esfuerzos (que es igual a la de las resistencias)

La gráfica de esta teoría, para un estado de esfuerzo biaxial (con $s_1 = s_4 = s_5 = 0$), se muestra en la figura 3. El rectángulo es la proyección de un “hipercubo” (cuyos lados son las resistencias de 1 a 6) en el plano s_2 - s_6 . La falla ocurriría cuando s_2 y s_6 definen un punto sobre o fuera del contorno del rectángulo.

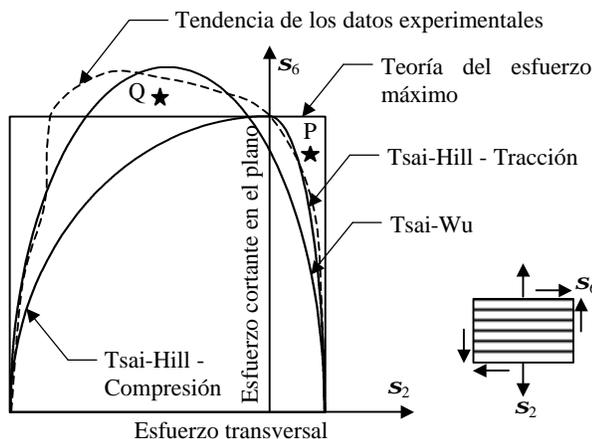


Figura 3. Gráficas de las teorías de falla en el plano s_2 - s_6 . Se muestra la tendencia de datos experimentales

Similar a lo que ocurre en materiales homogéneos e isotrópicos, esta teoría es más adecuada para los modos

de falla frágiles¹. Esta teoría tiene la ventaja de que da información sobre el modo de falla que ocurriría en el elemento. Por ejemplo, cuando $s_2 > F_{2t}$ (ecuación 1), el compuesto falla debido a la acción de los esfuerzos de tracción en la dirección transversal (falla a tracción transversal). Conociendo el posible modo de falla, fácilmente se pueden hacer cambios en el diseño de la lámina para reducir la probabilidad de que ocurra falla en ese modo. Por ejemplo, se puede cambiar la orientación de las fibras o adicionar más material en la dirección crítica del laminado.

Por otro lado, una gran desventaja de este criterio es que no tiene en cuenta la interacción de esfuerzos (en la práctica si la hay), y no concuerda bien con datos experimentales. Como se aprecia en la figura 3, el punto P sería un punto de no falla de acuerdo a la teoría, pero los datos experimentales, indicados por la curva a trazos, indican que P fallaría (debido a que existe una interacción entre los dos esfuerzos). En algunas zonas la teoría es conservativa, como ocurre en el punto Q, donde los datos experimentales sugieren que no ocurriría la falla, contrario a lo que predice la teoría, ya que cae fuera del contorno.

La **teoría de la deformación máxima** predice que la falla ocurre cuando alguna componente de deformación a lo largo de uno de los ejes principales del material es igual o mayor que el valor experimental de deformación correspondiente que produciría la falla. Ésta tomaría lugar cuando al menos una de las siguientes ecuaciones se cumple:

$$\begin{aligned} e_1 &= e_{1t}^u, \text{ si } e_1 > 0 \quad \text{ó} \quad |e_1| = e_{1c}^u, \text{ si } e_1 < 0, \\ e_2 &= e_{2t}^u, \text{ si } e_2 > 0 \quad \text{ó} \quad |e_2| = e_{2c}^u, \text{ si } e_2 < 0, \\ |g_4| &= g_4^u, \quad |g_5| = g_5^u, \quad |g_6| = 2|e_{12}| = g_6^u, \end{aligned} \quad (2)$$

donde e_1 , e_2 , g_4 , g_5 y g_6 son las deformaciones del punto de interés, y e_{1t}^u , e_{1c}^u , e_{2t}^u , e_{2c}^u , g_4^u , g_5^u y g_6^u son las deformaciones de falla, las cuales siempre se toman positivas. El subíndice ‘c’ indica compresión y ‘t’ tracción, y los números indican las direcciones de las deformaciones conforme a la convención de esfuerzos de la figura 2.

Las ventajas y desventajas de esta teoría son similares a la del esfuerzo máximo, pero debido a que las relaciones entre esfuerzos y deformaciones involucran la relación de Poisson, ν , esta teoría sí tiene en cuenta la interacción entre los esfuerzos, aunque en un grado muy pequeño. Por ejemplo, cuando se calcula e_1 , tanto s_1 como s_2 se toman en cuenta, pero como esta última está multiplicada por la relación de Poisson, este producto no contribuye mucho en el valor de e_1 .

Las dos teorías anteriores no son conservativas cuando dos esfuerzos (o deformaciones) cercanos a sus valores

¹ Note que un laminado puede estar compuesto por materiales dúctiles, frágiles o ambos, y que la selección de la teoría de falla se basa en la característica del modo de falla y no en la de los materiales.

últimos interactúan para producir un mismo modo de falla. Se propusieron entonces otras teorías para involucrar esta interacción. La **teoría Tsai-Hill** es un criterio similar al de von Mises que se propuso para ajustarse a datos experimentales de materiales ortotrópicos. De acuerdo a la teoría, la falla ocurre si:

$$\frac{(\mathbf{s}_1)^2}{(F_1)^2} - \frac{\mathbf{s}_1\mathbf{s}_2}{(F_1)^2} + \frac{(\mathbf{s}_2)^2}{(F_2)^2} + \frac{(\mathbf{s}_6)^2}{(F_6)^2} + \frac{(\mathbf{s}_4)^2}{(F_4)^2} + \frac{(\mathbf{s}_5)^2}{(F_5)^2} = 1, \quad (3)$$

donde $F_1 = F_{1t} = F_{1c}$ y $F_2 = F_{2t} = F_{2c}$. Esta teoría se ajusta mejor a los datos experimentales para ciertos rangos de esfuerzos. Tiene la ventaja adicional de tener en cuenta la interacción de los esfuerzos, ya que como se aprecia en la ecuación, todos los esfuerzos se involucran en el cálculo, para cualquier estado de esfuerzo. Sin embargo, esta teoría no identifica el o los modos que interactúan para producir la falla, aunque si se comparan las magnitudes relativas de los términos de la ecuación 3, podrían apreciarse los mecanismos que más efecto tienen sobre la falla. Además, la ecuación involucra todos los modos de falla, haciendo interactuar algunos de ellos que pueden no estar aportando realmente a la falla de la lámina, ya que en general no todos los modos aparecen simultáneamente en un laminado. Adicionalmente, la teoría Tsai-Hill no es apropiada para materiales que tienen diferentes resistencias en tracción y compresión, ya que utiliza un solo valor de resistencia en cada dirección, sin importar si es en tracción o compresión. A pesar de esto, pueden trazarse curvas para tracción y para compresión, tal como se aprecia en la figura 3. Después, se propuso una modificación de la teoría de Hill, la **teoría Tsai-Wu**, mediante la adición de algunos términos:

$$f_1\mathbf{s}_1 + f_2\mathbf{s}_2 + f_{11}(\mathbf{s}_1)^2 + f_{22}(\mathbf{s}_2)^2 + 2f_{12}(\mathbf{s}_1\mathbf{s}_2) + f_{66}(\mathbf{s}_6)^2 + f_{44}(\mathbf{s}_4)^2 + f_{55}(\mathbf{s}_5)^2 - 1 = 0, \quad \text{donde}$$

$$f_1 = F_{1t}^{-1} - F_{1c}^{-1}, \quad f_2 = F_{2t}^{-1} - F_{2c}^{-1}, \quad f_{11} = (F_{1t}F_{1c})^{-1},$$

$$f_{22} = (F_{2t}F_{2c})^{-1}, \quad f_{66} = F_6^{-2}, \quad f_{44} = F_4^{-2} \text{ y } f_{55} = F_5^{-2}.$$

El coeficiente f_{12} , que introduce la interacción entre los dos esfuerzos normales, debe obtenerse mediante algún tipo de ensayo biaxial, los cuales no son fáciles de realizar, por lo que no es fácil conseguir datos experimentales. Este coeficiente puede aproximarse a un valor obtenido en el ensayo de tracción transversal (las fibras están orientadas un cierto ángulo \mathbf{q} con respecto a la dirección del esfuerzo \mathbf{s}_x) o mediante fórmulas matemáticas. La siguiente es una de ellas:

$$f_{12} \cong -0.5(F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c})^{-0.5}. \quad (5)$$

El contorno de esta teoría para el estado de esfuerzo biaxial considerado antes se muestra en la figura 3. Algunas características de este criterio son:

- Esta teoría concuerda mejor con los datos experimentales disponibles.

- La ecuación tiene en cuenta diferencias entre la resistencia a la tracción y la de compresión.
- Es fácil de usar en programas computacionales.
- Al igual que la teoría Tsai-Hill, no diferencia entre falla de la fibra y falla de la matriz.

Para carga biaxial, esta teoría concuerda con datos experimentales cuando los dos esfuerzos que actúan afectan el mismo mecanismo (por ejemplo falla de la matriz). Sin embargo, cuando hay dos mecanismos de falla diferentes, la transición entre éstos no es suave como la teoría predice. Además, igual que la teoría Tsai-Hill, ésta relaciona modos de falla (datos de resistencia) en la ecuación que algunas veces no contribuyen realmente a la falla del compuesto. Por ejemplo, la resistencia a la compresión no es pertinente cuando la falla es producida por tracción, y no debería ser involucrada.

Para la selección de una teoría de falla es necesario tener en cuenta que para materiales con comportamiento frágil sometidos a tracción, la teoría del esfuerzo máximo o la de la deformación máxima parecen ser las más apropiadas. Para materiales con comportamiento dúctil anisotrópicos, las teorías Tsai-Hill y Tsai-Wu podrían ser útiles para cargas que predominan en cortante o compresión.

Como se mencionó al comienzo de la sección 3.2, estas teorías son aplicables a la falla de una lámina. En general, para definir la falla de un laminado es necesario usar estas teorías dentro de un procedimiento de cálculo más largo, el cual involucra el cálculo de la falla inicial (de la primera lámina) y el cálculo de la resistencia última del laminado. A la fecha se han propuesto una gran variedad de métodos o teorías para predecir la falla de laminados. La sección 3.3 describe brevemente el estado actual de la investigación en este campo.

3.3. Estado actual de investigación

La investigación en materiales compuestos lleva más de 50 años [2], y se han propuesto numerosas teorías o métodos para predecir la falla de láminas unidireccionales y de laminados multidireccionales. Aunque el análisis de los datos experimentales muestra que todos estos procedimientos no son adecuados para predecir la falla de estos materiales bajo cualquier condición de esfuerzos combinados estáticos, existen numerosas y exitosas aplicaciones de los compuestos. Esto se debe a que los diseñadores de compuestos comerciales no se basan exclusivamente en las teorías de falla. Normalmente éstas se usan para obtener dimensiones previas, pero el diseño final se basa en pruebas experimentales y típicamente se usan factores de seguridad mayores de 3, basados en la carga última, con el fin de compensar incertidumbres y la pérdida de desempeño por factores como fatiga, condiciones ambientales e impactos [2]. Las teorías de falla han sido tomadas por los industriales como una curiosidad

académica, en vez de herramientas prácticas de diseño. Sin embargo, con el fin de reducir tiempos y costos (los procedimientos de ensayo son muy complejos y costosos) y de diseñar elementos más complejos, este punto de vista está comenzando a cambiar [2].

Basados en la desconfianza que existe en las teorías de falla, se lanzó un proyecto llamado “ejercicio mundial de falla” (*world wide failure exercise*). Dicho proyecto fue lanzado en 1995, aunque comenzó en 1991 con una reunión de expertos en la cual se discutió sobre la falla de compuestos poliméricos. En el proyecto, que acaba de terminarse, se evaluó la capacidad de 19 teorías para predecir la falla y deformaciones de laminados compuestos con fibras de refuerzo y matriz polimérica (epóxica). Estas teorías se ordenaron de acuerdo a la exactitud de sus predicciones con respecto a los resultados experimentales disponibles.

La referencia [3] presenta las conclusiones de este proyecto. Desafortunadamente, y a pesar de que durante su ejecución se propusieron nuevas teorías, los resultados indican que ninguna de estas teorías es confiable, y algunas de ellas sólo se podrían utilizar para casos limitados. Esto se debe a la complejidad en predecir la falla de compuestos laminados, como se discutió en la sección 3.1. A pesar de esto, [3] propone como mejores candidatos para ser utilizados en diseños prácticos de laminados compuestos a las teorías de Zinoviev (la cual utiliza la teoría del esfuerzo máximo y un cuidadoso análisis de pos-falla), Bogetti (que utiliza una forma tridimensional de la teoría de la deformación máxima), Puck, Cuntze y Tsai (que emplea la teoría interactiva Tsai-Wu). Puck, Cuntze o Tsai pueden utilizarse para predecir la falla de un laminado unidireccional, y aunque la capacidad de predicción en laminados multidireccionales es muy pobre, Bogetti y Zinoviev pueden usarse para predecir la falla inicial y Puck y Cuntze para la final [3]. Debe anotarse que estos nombres indican los investigadores que participaron en el proyecto, y no estrictamente los que desarrollaron las teorías.

Entre los diseñadores e investigadores alrededor del mundo no hay un acuerdo acerca de cuál es el mejor método o teoría para predecir la falla de compuestos laminados, debido a que la validez de las diferentes teorías está restringida a rangos limitados de esfuerzos combinados. Por esta razón, cuando se desea un diseño conservativo, muchos autores recomiendan usar las cuatro teorías descritas en este artículo (o procedimientos basados en estas), particularmente, cuando el modo de falla y el comportamiento del material no están claramente establecidos. El resultado más conservador (obtenido con el contorno más pequeño) sería el que se usaría.

4. CONCLUSIONES

La falla de los compuestos laminados es difícil de definir y predecir. En ésta intervienen varios mecanismos de

falla, los cuales interactúan entre sí para producir la falla del material. Generalmente, son muchos los factores que intervienen en el proceso de falla, tales como resistencia de la adhesión de la interfase e interfaz, uniformidad en la resistencia de las fibras, tipo de carga y orientación de las fibras, y en muchos casos es difícil predecir cuáles modos de falla ocurrirán o hasta que punto ciertos mecanismos o propiedades afectan el proceso. Adicionalmente, en muchos casos no es fácil definir qué nivel de degradación del laminado es inaceptable.

Se han propuesto diferentes criterios de falla de láminas y procedimientos para el cálculo de laminados. Cada uno de ellos podría ser utilizado en ciertos casos limitados, aunque ninguno es satisfactorio, como lo muestra el resultado del ejercicio mundial de falla. A pesar de que casi todas estas teorías tienen grandes deficiencias tanto en el modelado de la falla como en la concordancia con resultados experimentales, algunos autores recomiendan aplicar todas ellas y diseñar con base en todos los resultados de una manera conservadora. Entonces, no existe todavía una teoría realmente adecuada, que esté de acuerdo con los datos experimentales y que además represente de una manera satisfactoria los mecanismos de falla reales que ocurren en el laminado. Las actuales teorías no son suficientemente flexibles y algunas deben desarrollarse más para involucrar diferentes aspectos que contribuyen a la falla. La alternativa típica por la que optan los diseñadores comerciales es basar sus diseños en resultados experimentales, pero éstos tienden a ser muy costosos. Falta entonces mucho por hacer en este campo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BARBERO, E.J. *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis, West Virginia Univ., U.S.A., 1998.
- [2] HINTON, M.J. y SODEN, P.D. Predicting Failure in Composite Laminates: the Background to the Exercise, *Composites Science and Technology*, 58, 1001-1010, 1998.
- [3] SODEN, P.D., KADDOUR, A.S. y HINTON, M.J. Recommendations for Designers and Researchers Resulting from the World-Wide Failure Exercise, *Composites Science and Technology*, 64, 589-604, 2004.
- [4] BADER, M.G. Polymer Composites in 2000: Structure, Performance, Cost and Compromise, *J of Microscopy*, 201(2), 110-121, 2001.
- [5] COLORADO, A. *La Guadua. Una Maravilla Natural de Grandes Bondades y Promisorio Futuro*. <http://www.revista-mm.com/rev34/guadua.htm> (acceso marzo de 2004).
- [6] DANIEL, I.M. y ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford Student Edition, Oxford University Press, U.S.A., 1994.
- [7] HARPER, C.A. *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*, 3ª ed., McGraw Hill, U.S.A., 1996.
- [8] SODEN, P.D., HINTON, M.J. y KADDOUR, A.S. A Comparison of the Predicting Capabilities of Current Failure Theories for Composite Laminates, *Composites Science and Technology*, 58, 1225-1254, 1998.
- [9] VINSON, J.R. y SIERAKOWSKI, R.L. *The Behaviour of Structures Composed of Composite Materials*, 2ª edición, Kluwer Academic Publishers, U.S.A., 2002.