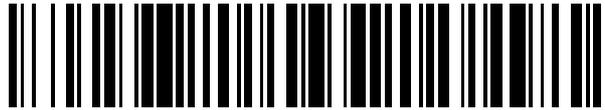


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 543 952**

51 Int. Cl.:

**B32B 15/08** (2006.01)

**B64C 1/12** (2006.01)

**B64C 3/26** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.10.2012 E 12787530 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.06.2015 EP 2763849**

54 Título: **Estratificado de fibra-metal mejorado**

30 Prioridad:

**31.10.2011 NL 2007683**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**26.08.2015**

73 Titular/es:

**GTM-ADVANCED STRUCTURES B.V. (100.0%)  
Laan van Ypenburg 84  
2497 GB 's-Gravenhage, NL**

72 Inventor/es:

**WILSON, GREGORY;  
ALDERLI-ESTEN, RENÉ y  
GUNNIK, JAN WILLEM**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 543 952 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Estratificado de fibra-metal mejorado

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas. Más particularmente, la invención se refiere a un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas que tienen una configuración óptima.

**Antecedentes de la invención**

10 El comportamiento de las estructuras de ingeniería bajo carga está determinado por muchos parámetros de diseño, y definir el material óptimo para una aplicación específica es a menudo una tarea tediosa y, además, tiene que enfrentarse con requisitos contradictorios. Entre los materiales de ingeniería comúnmente usados están metales, como aleaciones de acero, aleaciones de titanio, aleaciones de magnesio, aleaciones de aluminio; materiales compuestos reforzados con fibras, como materiales compuestos de fibra de vidrio, materiales compuestos de fibra de carbono, y materiales compuestos de aramida; y materiales híbridos, definidos adicionalmente en adelante.

15 Los materiales compuestos reforzados con fibras ofrecen considerable ventaja de peso con respecto a otros materiales preferidos, como los metales. En general, el ahorro de peso se obtiene con el sacrificio de otras propiedades importantes del material tal como ductilidad, tenacidad, resistencia de apoyo, conductividad y capacidad de conformación en frío. Para superar estas deficiencias, se han desarrollado nuevos materiales híbridos llamados estratificados de fibra-metal para combinar los mejores atributos del metal y de los materiales compuestos.

20 Los estratificados de fibra-metal (también denominados FML), tales como los descritos en el documento US 4.500.589, por ejemplo, se obtienen apilando láminas alternantes de metal (lo más preferiblemente de aluminio) y productos preimpregnados reforzados con fibras, y curando el apilamiento bajo calor y presión. Estos materiales se utilizan cada vez más en industrias tales como la industria del transporte, por ejemplo en barcos, coches, trenes, aviones y naves espaciales. Pueden ser utilizados como láminas y/o un elemento de refuerzo y/o como un rigidizador para estructuras (cuerpo) de estos medios de transporte, como en los aviones para las alas, fuselaje y paneles de cola y/u otros paneles de revestimiento y elementos estructurales del avión.

25 El documento WO 2009/095381 A1 divulga un estratificado de fibra-metal en el que la fracción de volumen de metal varía entre 0 y 47 %.

30 El documento WO 2007/145512 A1 divulga un estratificado de fibra-metal que comprende láminas de metal gruesas con un espesor superior a 1 mm. Las láminas de metal gruesas están unidas a otras capas del estratificado mediante una capa de material compuesto reforzado con fibras que tiene una fracción de volumen de fibra  $V_f$  menor que 45 %.

35 Los documentos EP 0312150 A1, EP 0312151 A1 y US 4.500.589 A describen otros estratificados de fibra-metal útiles con capas de materiales compuestos reforzados con fibra que tienen cargas de fibra desde 35-75 % en volumen.

El artículo de R. van Rooijen et al., titulado "Property Optimisation in Fibre Metal Laminates", APPLIED COMPOSITE MATERIALS, vol. 11, nº 2, 1 de marzo de 2004, páginas 63-76, divulga otros estratificados útiles.

40 El artículo de P. Mathivanan et al., titulado "Metal Thickness, Fiber Volume fraction Effect on the Tensile Properties, Debonding of Hybrid Laminates", JOURNAL OF REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, vol. 29, nº 14, 1 de julio de 2010, páginas 2128-2140, divulga un número de estratificados de aluminio/reforzado con fibras de vidrio con diferentes espesores de la capa de aluminio. El módulo y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto utilizadas realmente en los FML del artículo no se divulgan de forma clara y sin ambigüedades.

45 Aunque los estratificados de fibra-metal pueden proporcionar una mejorada resistencia a la fatiga (en particular a la propagación de grietas) sobre las aleaciones de metales, en particular las aleaciones de aluminio, su comportamiento en una estructura está todavía abierta a mejoras, en particular en las estructuras que están sujetas a cargas dinámicas y necesitan también alta resistencia estática y, en particular, alta resistencia de la unión mecánica. Una característica importante a este respecto es la resistencia al crecimiento de la grieta, así como buena resistencia de la unión de la estructura. Sería muy deseable que las láminas de metal adecuadas y las capas de material compuesto reforzado con fibras pudieran ser identificadas en términos de sus propiedades con vistas a  
50 lograr las menores velocidades de crecimiento de la grieta del correspondiente estratificado de fibra-metal con un adecuado comportamiento de resistencia de la unión.

Los estratificados de fibra-metal del tipo de aquellos según la invención están conectados preferiblemente a otros componentes de una estructura, y por lo tanto pueden estar provistos de muescas para llevar a cabo la conexión. Tales muescas proporcionan concentraciones de tensión que pueden influir negativamente en la resistencia a la

fatiga. Un objeto adicional de la invención es proporcionar un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas, que tienen un comportamiento óptimo de la muesca en carga dinámica.

- 5 Un objeto de la invención es proporcionar un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas con una respuesta estructural óptima en carga dinámica, en particular, con la menor velocidad de crecimiento de la grieta dando al mismo tiempo adecuada resistencia de la unión.

**Sumario de la invención**

- 10 Según un aspecto de la presente invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas que tienen una gama de propiedades de fibra y de metal que producen una respuesta estructural óptima.

- 15 Según otro aspecto de la presente invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal de capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas, comprendiendo el estratificado una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y una lámina de metal adyacente, para cuya combinación se satisfacen las siguientes relaciones:

$E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  tiene un valor entre un valor límite inferior dado por

$a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))}$  con  $b = 0,36$  y  $c = 0,3$  (1a)

y cero cuando  $V_f \leq 0,3$ , (1b)

y un valor límite superior dado por

20  $a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))}$  con  $b = 0,88$  y  $c = 0$  (1c)

$0,10 \leq V_f < 0,54$  (2)

$E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 400 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>) (3)

en donde  $a = 1.200$  kN/mm<sup>4</sup>; y

- 25  $E_{comp}$  = módulo de Young a la tracción de la capa de material compuesto reforzado con fibras en kN/mm<sup>2</sup> en la combinación, tomado en la dirección de la más alta rigidez de la capa de material compuesto

$E_{lam}$  = módulo de Young a la tracción del estratificado total de fibra-metal en kN/mm<sup>2</sup>, tomado en la misma dirección que  $E_{comp}$

$E_{metal}$  = módulo de Young a la tracción de la lámina de metal en kN/mm<sup>2</sup> en la combinación

$t_{metal}$  = espesor de la lámina de metal en mm en la combinación

- 30  $V_f$  = fracción de volumen de fibra de la capa de material compuesto reforzado con fibras en la combinación

Debe entenderse que un valor de  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  entre el límite inferior y el límite superior incluye los valores límites extremos inferior y superior.

- 35 Las relaciones (1) a (3) definen las propiedades óptimas de una capa de material compuesto reforzado con fibras (estas propiedades dependen de la fracción de volumen de fibra de la capa) y las propiedades de una lámina de metal adyacente a dicha capa de material compuesto reforzado con fibras en términos de resistencia a la fatiga del estratificado de fibra-metal. Las combinaciones de  $V_f$  y  $t_{metal}$  que satisfacen las relaciones (1) a (3) producen un número máximo de ciclos de resistencia a la fatiga en un ensayo de fatiga, en particular, en un ensayo de fatiga con muesca, y al mismo tiempo proporcionan un comportamiento mejorado de la unión.

- 40 Las láminas de metal en estratificados de fibra-metal según un aspecto de la invención se seleccionan de manera que  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 400 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>). Parece que tales láminas de metal contribuyen en gran medida a la resistencia de la unión del estratificado. Es bien sabido que para estructuras muy cargadas, como el ala inferior de un avión, por ejemplo, los estratificados de fibra-metal estándares conocidos, tales como los estratificados GLARE, que tienen capas de aleación de aluminio, en general, con espesores de 0,4 mm e inferiores, muestran un comportamiento limitado de resistencia de la unión. Tales estratificados de fibra-metal conocidos que tienen valores de  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) \geq 400 * V_f$  N/mm<sup>4</sup> están, por tanto, fuera del alcance de la invención.

- 45 Es suficiente cuando en un estratificado de fibra-metal sólo una capa de material compuesto-fibra y una lámina de metal adyacente a la misma satisfacen las relaciones (1) a (3). No hay necesidad, por tanto, de que todas las láminas de metal tengan un espesor que satisfaga las relaciones (1) y (3), ni que todas las capas de material compuesto reforzado con fibras satisfaga las relaciones (1) a (3). En una realización de un estratificado de fibra-

metal según la invención, sin embargo, las propiedades en cualquier combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y una lámina de metal adyacente satisfacen las relaciones (1) a (3).

5 Otra realización del estratificado de fibra-metal según la invención se caracteriza por que las propiedades en una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y dos láminas de metal adyacentes de diferente espesor, la más gruesa de las dos láminas de metal adyacentes satisfacen las relaciones (1) a (3).

Debe entenderse que cuando se habla de "el espesor" del metal y de las capas de material compuesto con fibra, se supone que tales capas de metal y de material compuesto con fibras tienen un espesor constante. Sin embargo, las capas también pueden tener un espesor variable, tal como con las láminas de metal ahusadas. En tales casos, el espesor debe entenderse como espesor medio.

10 En una realización particularmente preferida del estratificado de fibra-metal según la invención, el estratificado comprende láminas de metal, en las que  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 300 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>), más preferentemente  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 250 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>), y lo más preferiblemente  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 200 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>). Tales estratificados muestran un comportamiento de resistencia de la unión cada vez mejor y al mismo tiempo un buen comportamiento a la fatiga con muesca.

15 Otra realización preferida del estratificado de fibra tiene fibras en las capas de material compuesto reforzado con fibras con  $E_{fibra} \geq 80$  GPa, más preferido  $E_{fibra} \geq 85$  GPa, y lo más preferido  $E_{fibra} \geq 90$  GPa.

20 Una capa de material compuesto reforzado con fibras en el estratificado de la invención se define que es una capa que se extiende desde una lámina de metal a otra (o a una superficie del extremo del estratificado). Una capa de este tipo puede comprender una o más láminas de material compuesto, en cuyo último caso las láminas están apiladas formando la capa. Las capas o láminas de material compuesto reforzado con fibras comprenden preferiblemente fibras sustancialmente en una dirección (denominados materiales compuestos unidireccionales o UD) aunque las capas o láminas también puedan ser de capas cruzadas, que tienen fibras de refuerzo que se dirigen en direcciones mutuamente perpendiculares, capas en ángulo, que tienen fibras que se dirigen en direcciones que difieren de la dirección de carga principal, y cualquier combinación de las mismas. No se prefiere el uso de telas tejidas en las capas reforzadas con fibras y, por lo tanto, se excluyen en una realización preferida.

30 Las capas de material compuesto reforzado con fibras en el estratificado de la invención puede que tengan preferiblemente propiedades anisótropas, es decir, las propiedades de rigidez y resistencia varían según la dirección en la que se determinan. Según la invención, el módulo de Young a la tracción de las capas de material compuesto reforzado con fibras en el estratificado en las ecuaciones (1) a (3) es tomado en la dirección de mayor rigidez, lo que corresponde a la dirección a lo largo de la cual se alinean la mayoría de las fibras. Cuando las capas de material compuesto reforzado con fibras en el estratificado de la invención muestran propiedades anisótropas, lo mismo puede valer para el estratificado. El módulo de Young a la tracción del estratificado total de fibra-metal en las ecuaciones (1) a (3) está, por lo tanto, también definido como tomado en la misma dirección que el módulo de las capas de material compuesto reforzado con fibras.

35 La invención se refiere además a un procedimiento para obtener el espesor de la lámina de metal y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras en un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidos con el fin de obtener propiedades de fatiga óptimas del estratificado de fibra-metal, comprendiendo el procedimiento seleccionar una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y una lámina de metal adyacente, seleccionar un espesor de la lámina de metal o una fracción de volumen de fibra, y calcular la correspondiente fracción de volumen de fibra o espesor de la lámina de metal que satisface las relaciones (1) a (3) anteriormente descritas. Los estratificados según la invención utilizan una combinación de material compuesto de fibra y metal que satisface las relaciones (1) a (3), y tales configuraciones se pueden obtener seleccionando en primer lugar un metal y un material compuesto reforzado con fibras y determinando el módulo de Young a la tracción de ambos a temperatura ambiente, suponiendo un valor de partida  $V_f$  para la fracción de volumen de fibra del material compuesto reforzado con fibra, teniendo en cuenta la relación (2). A continuación se selecciona un valor de partida  $t_{metal}$  para el espesor de las láminas de metal o un  $V_f$  para la fracción de volumen de fibra, y se comprueba frente a las Ec. (1) y (3). Téngase en cuenta que el espesor  $t_{metal}$  de las láminas de metal y la fracción  $V_f$  de volumen de fibra de la capa de material compuesto son ambos necesarios para calcular el módulo de Young a la tracción  $E_{lam}$  del estratificado de fibra-metal. La selección de los valores de partida para  $t_{metal}$  y  $V_f$  es ayudada por la idea de que a medida que aumenta el espesor de la lámina de metal debería, generalmente, disminuir la  $V_f$  y viceversa para satisfacer al mismo tiempo las Ec. (1) a (3).

Las realizaciones preferidas del procedimiento se proporcionan en las reivindicaciones adjuntas.

55 Un estratificado de fibra-metal que satisface las relaciones (1) a (3) muestra propiedades óptimas, lo que quiere decir un buen comportamiento de la unión, así como una menor velocidad de crecimiento de la grieta que los estratificados reforzados con fibras que no satisfacen las relaciones (1) a (3). Esta enseñanza no ha sido divulgada antes y la combinación de espesor de lámina de metal y fracción de volumen de fibra del material compuesto que ofrece la menor velocidad de crecimiento de la grieta puede ahora determinarse.

Para obtener un estratificado de fibra-metal específicamente robusto según la invención, se prefiere un estratificado de fibra-metal según la reivindicación 2 adjunta. Un estratificado de fibra-metal según esta realización no sólo exhibe una alta resistencia frente al crecimiento de la grieta con un buen comportamiento de la unión, sino que también se puede lograr una mayor rigidez, que es por ejemplo importante en el comportamiento en compresión y en el comportamiento aeroelástico.

En comparación con los materiales compuestos de ingeniería, los estratificados según la invención son apenas sensibles a la compresión después de la degradación por impacto (muy a menudo incluso mejor que su ingrediente metal) y por lo tanto pueden ser diseñados con una sustancial mayor deformación a fallo que las estructuras de materiales compuestos con fibras. Además, la combinación de las capas de material compuesto fibroso y las láminas de metal con propiedades que satisfacen las ecuaciones (1) a (3) dan como resultado en general un estratificado de fibra-metal con una rigidez mayor de la que tienen las láminas de metal correspondientes por encima de su límite de proporcionalidad, y en consecuencia aumentará el límite elástico.

En otra realización de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $V_f < 0,50$ . Esto está en contraste con la enseñanza general de que las propiedades del material compuesto con fibra mejoran con el aumento de la fracción de volumen de fibra y por lo tanto  $V_f$  debería ser lo más alta posible.

Se prefiere una realización del estratificado de fibra-metal según la invención en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,10 < V_f < 0,54$ , y, en particular  $0,15 < V_f < 0,50$ . Aún más preferido es un estratificado de fibra-metal en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,20 < V_f < 0,45$  y lo más preferido es una fracción de volumen de fibra de la capa de material compuesto reforzado con fibras que satisface  $0,20 < V_f < 0,40$  para un estratificado óptimo que satisface al mismo tiempo los requisitos de fatiga con un buen comportamiento de la unión, así como una gran rigidez.

Según un aspecto adicional de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal que comprende un número de  $n$  capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas alternas de metal mutuamente unidas. Los estratificados preferidos comprenden una o las dos capas exteriores de metal, o una o las dos capas exteriores de material compuesto reforzado con fibras. Particularmente preferido es un estratificado de fibra-metal de tres capas que comprende dos láminas de metal y una capa de material compuesto reforzado con fibras, o, alternativamente, una lámina de metal y dos capas de material compuesto reforzado con fibras.

Aunque el espesor de las láminas de metal en el estratificado de fibra-metal de la invención pueden todos ser iguales, según una realización de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal que comprende láminas de metal de diferentes espesores en el cual una o más de las láminas de metal satisface las relaciones (1) a (3). Una realización adicional de la invención proporciona un estratificado de fibra-metal, que comprende láminas de metal de diferentes aleaciones de metal. Según otra realización, sin embargo, puede proporcionarse un estratificado de fibra-metal que comprende láminas de metal de la misma aleación de metal.

En otro aspecto de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal que comprende capas de diferentes espesores de material compuesto reforzado con fibras en el que una o más capas de material compuesto reforzado con fibras satisface las relaciones (1) a (3). Una realización preferida es una en la que al menos una de las capas de material compuesto reforzado con fibras adyacente a la capa de metal más gruesa cumple los requisitos de las relaciones (1) a (3) junto con dicha capa de metal más gruesa. Un estratificado de fibra-metal, que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras de diferentes espesores entre las capas de metal proporciona otra realización útil.

El espesor de la lámina o láminas de metal puede ser elegido dentro de un amplio intervalo, siempre y cuando se satisfagan las relaciones (1) a (3). Una realización preferida de los estratificados de fibra-metal según la invención comprende láminas de metal que tienen un espesor de  $0,4 \text{ mm} < t_{\text{metal}} \leq 4 \text{ mm}$ , ya que los efectos de la invención son más evidentes en este intervalo. Incluso más preferida es una realización del estratificado de fibra-metal en el que el espesor de las láminas de metal está en el intervalo de  $0,5 \text{ mm} < t_{\text{metal}} \leq 2 \text{ mm}$ .

En otro aspecto de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal en el que las fibras en las capas de material compuesto reforzado con fibras se extienden en al menos una dirección (llamada UD) y el espesor de las láminas de metal es inferior a 1,5 mm.

En otro aspecto de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal en el que el espesor de las láminas de metal varía entre 0,5 mm y 4 mm, más preferiblemente entre 0,5 mm y 2 mm, y lo más preferiblemente entre 0,6 mm y 1,5 mm.

Todavía otra realización según la invención proporciona un estratificado de fibra-metal en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,20 < V_f < 0,50$  y el espesor de las láminas de metal es igual o inferior a 2 mm.

Aún más preferido es un estratificado de fibra-metal en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,30 < V_f < 0,50$  y el espesor de las láminas de metal es igual o inferior a 1,2 mm.

5 Aunque el metal de las láminas de metal en el estratificado de fibra-metal se puede elegir a voluntad, todavía en otro aspecto de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal en donde el metal de las láminas de metal se selecciona a partir de aleaciones de acero, aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio y aleaciones de titanio, en las que son particularmente útiles las aleaciones de aluminio, las aleaciones de magnesio y las aleaciones de titanio.

10 En una realización adicional preferida de la invención, se proporciona un estratificado de fibra-metal en el que las capas de material compuesto reforzado con fibras comprenden vidrio, aramida, PBO, copolímero o fibras de carbono, o combinaciones de los mismos. Las capas de material compuesto reforzado con fibras pueden comprender fibras sustancialmente continuas que se extienden principalmente en una dirección y/o pueden comprender fibras sustancialmente continuas que se extienden principalmente en dos direcciones perpendiculares, tal como en una capa transversal en  $0^\circ/90^\circ$  y/o en ángulos con respecto a la dirección  $0^\circ$ , como por ejemplo formando  $+45^\circ/-45^\circ$  o, por ejemplo, para adaptación aeroelástica, en una dirección que se desvía de la dirección de  $0^\circ$ . El más preferido es un estratificado en el que las fibras en las capas de material compuesto están orientadas en una dirección, es decir, unidireccional. Una tela tejida se excluye en una realización preferida de la invención.

20 Un estratificado de fibra-metal particularmente preferido según la invención comprende un doblador plano o curvado y un revestimiento de aluminio-litio para un fuselaje, ala o plano de cola. Aún en otro aspecto de la invención, un montaje de un estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes y un elemento adicional, estando el elemento adicional conectado con el estratificado de fibra-metal mediante una capa de unión, que comprende un adhesivo y/o un material compuesto reforzado con fibras, o estando conectado mediante medios de fijación mecánicos. El elemento adicional comprende preferiblemente un elemento estructural y/o combinaciones de elementos estructurales seleccionados de un rigidizador, tal como una sección en ángulo, un larguerillo en Z, un larguerillo en sombrero, un larguerillo en C, un larguerillo en Y, un larguero (sección), una costilla (sección), listones-cizalla y/o marco (sección) de una estructura de la aeronave.

25 En otro aspecto de la invención, el elemento adicional comprende una placa plana o ahusada fabricada de un metal, tal como una aleación de aluminio, una aleación de magnesio, una aleación de titanio y/o una aleación de acero y/o una combinación de láminas de metal y capas de material compuesto.

30 Todavía en otro aspecto de la invención, se proporciona un montaje de un estratificado de fibra-metal y un elemento adicional conectado al mismo en el que el elemento adicional comprende al menos un elemento estructural seleccionado de un rigidizador, tal como una sección en ángulo, un larguerillo en Z, un larguerillo en sombrero, un larguerillo en C, un larguerillo en Y, un larguero (sección), una costilla (sección), listones-cizalla y/o marco (sección) de una estructura de la aeronave, o una combinación de los mismos.

35 Todavía otro aspecto de la invención proporciona el uso de un montaje de este tipo en proporcionar una estructura resistente a la fatiga.

### Breve descripción de las figuras

Figura 1 - es una vista en perspectiva de un estratificado de fibra-metal según una realización de la presente invención;

40 Figura 2 - es una vista en perspectiva de un estratificado de fibra-metal según otra realización de la presente invención;

Figuras 3-7 - ilustran la relación entre la resistencia a la fatiga y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras en varias realizaciones del estratificado reforzado con fibras según la invención;

45 Figura 8 - ilustra la relación entre los parámetros de la reivindicación 1 y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras para varias realizaciones del estratificado reforzado con fibras según la invención;

50 Figura 9 - ilustra la relación entre los parámetros de la reivindicación 2 y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras para otras diversas realizaciones del estratificado reforzado con fibras según la invención; y

Figura 10 - muestra el comportamiento hasta fatiga de estratificados reforzados con fibras con diferentes fracciones de volumen de fibra, medido por el crecimiento de la grieta bajo cargas cíclicas para diferentes longitudes de la grieta.

### Descripción detallada de la invención

En la siguiente descripción, se hace referencia a los dibujos adjuntos, que forman parte de la misma, y que muestran, a modo de ilustración, realizaciones específicas en las que puede ponerse en práctica la invención. La presente invención, sin embargo, puede ponerse en práctica sin los detalles específicos o con ciertos procedimientos equivalentes alternativos a los descritos en el presente documento.

La base de la presente invención es una disposición única de capas de material compuesto reforzado con fibras y al menos una lámina de metal. Según la invención se proporciona un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal, en el que las propiedades de la fibra están relacionadas con las propiedades de la lámina de metal de una manera específica, según lo dado por las ecuaciones (1) a (3). Las capas de material compuesto reforzado con fibras comprenden preferiblemente fibras preimpregnadas con un sistema matriz de material compuesto, preferiblemente un adhesivo metálico (preimpregnado). El sistema de capas de material compuesto y láminas de metal se procesa preferiblemente bajo calor y presión para curar el adhesivo y formar un panel o componente sólido.

Los autores de la invención han descubierto que los estratificados de fibra-metal con propiedades de fibra según las ecuaciones (1) a (3) tienen mejores propiedades estructurales en resistencia de la unión, así como en la fatiga, en particular una mayor resistencia frente al el crecimiento de la grieta que los estratificados de fibra-metal cuyas propiedades relevantes no están de acuerdo con las relaciones (1) a (3). Los parámetros utilizados en las ecuaciones (1) a (3) son bien conocidos por la persona experta en la técnica y esta persona no tendrá dificultades en determinar las propiedades mencionadas. La invención se basa en la idea de que el espesor de lámina de metal y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras están relacionadas con el fin de obtener una gran resistencia al crecimiento de la grieta.

La relación entre la fracción de volumen de fibra del estratificado de fibra-metal y la rigidez y espesor de las láminas de metal (ecuación (1)) según la invención se muestra gráficamente en la figura 8. Los estratificados de fibra-metal según varias realizaciones de la invención utilizan capas reforzadas con fibras con una fracción de volumen de fibra inferior a 0,54, es decir, por debajo de la línea 19 y entre las líneas 51 y 50. La línea 50 representa el límite superior dado por  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ;  $b = 0,88$ ; y  $c = 0$ . La línea 51 representa el límite inferior dado por  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ;  $b = 0,36$ ; y  $c = 0,3$ . La línea 20 representa el límite inferior para  $V_f < 0,3$  y la línea 54 representa el límite superior para la comportamiento de la unión dado por  $400 * V_f$  en  $\text{kN/mm}^4$ .

La figura 9 muestra gráficamente la relación entre la fracción de volumen de fibra del estratificado de fibra-metal y la rigidez y espesor de las láminas de metal (ecuación (1)) según otra realización en donde la línea 52 representa el límite superior dado por  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ;  $b = 0,85$ ; y  $c = 0,02$ , mientras que la línea 53 representa el límite inferior dado por  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ;  $b = 0,41$ ; y  $c = 0,26$ . Los estratificados de fibra-metal según varias realizaciones de la invención utilizan capas reforzadas con fibra con una fracción de volumen de fibra inferior a 0,54, es decir, por debajo de la línea 19 y entre las líneas 53 y 52. La línea 20 representa el límite inferior para  $V_f < 0,26$  y la línea 54 representa el límite superior para el comportamiento de la unión dado por  $400 * V_f$  en  $\text{kN/mm}^4$ .

Las capas de material compuesto reforzado con fibras en los estratificados de fibra-metal según la invención son ligeras y fuertes y comprenden fibras de refuerzo integradas en un polímero. El polímero también puede actuar como un medio de unión entre las diversas capas. Las fibras de refuerzo que son adecuadas para usar en las capas de material compuesto reforzado con fibras dependen de la elección de metal en las láminas de metal (véanse las ecuaciones (1) a (3)), pero pueden incluir fibras de vidrio, fibras de aramida, fibras de PBO, fibras de carbono, fibras de copolímero y fibras de metal y/o combinaciones de las fibras anteriores. Fibras preferidas incluyen fibras de refuerzo con una resistencia a la tracción y/o rigidez relativamente altas, de la que las fibras de la clase de alto módulo, tal como las fibras de carbono, son particularmente preferidas. Fibras de refuerzo preferidas incluyen fibras de copolímero, tal como las conocidas como fibras Copol® y disponibles de Teijin. Otras fibras preferidas tendrán una rigidez de la fibra de al menos  $E_{\text{fibra}} = 80 \text{ GPa}$ , o más preferido de al menos  $E_{\text{fibra}} = 85 \text{ GPa}$  y lo más preferido de al menos  $E_{\text{fibra}} = 90 \text{ GPa}$ .

Ejemplos de materiales matriz adecuados para las fibras de refuerzo incluyen, pero no se limitan a polímeros termoplásticos tales como poliamidas, poliimidias, polietersulfonas, polieteretercetona, poliuretanos, poli(sulfuros de fenileno) (PPS), poliamida-imidas, policarbonato, mezcla de poli(óxido de fenileno) (PPO), así como mezclas y copolímeros de uno o más de los polímeros anteriores. Los materiales matriz adecuados comprenden también polímeros termoestables tales como resinas epoxídicas, resinas de poliéster insaturado, resinas de melamina/formaldehído, resinas de fenol/formaldehído, poliuretanos, de los cuales los más preferidos son las resinas epoxídicas de polímeros termoestables. Según la invención, los materiales compuestos fibrosos comprenden menos de 54 % en volumen de fibras.

En el estratificado según la invención, la capa de material compuesto reforzado con fibras comprende preferiblemente fibras sustancialmente continuas que se extienden en múltiples direcciones (como  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y en ángulos con respecto a  $0^\circ$ ) y posiblemente en dos direcciones casi ortogonales (por ejemplo capas transversales). Sin embargo, es aún más preferible que la capa de material compuesto reforzado con fibras comprenda fibras sustancialmente continuas que se extiendan principalmente en una dirección (denominado material UD). Es

ventajoso utilizar la capa de material compuesto reforzado con fibras en forma de un producto semi-acabado preimpregnado. Un "preimpregnado" de este tipo muestra generalmente buenas propiedades mecánicas después del curado del mismo, entre otras razones porque las fibras ya se han humedecido previamente con el polímero matriz.

- 5 Pueden obtenerse estratificados de fibra-metal mediante la conexión de un número de láminas de metal y de capas de material compuesto reforzado con fibras entre sí por medio de calentamiento bajo presión y posterior enfriado. Los estratificados de fibra-metal de la invención tienen buenas propiedades mecánicas específicas (propiedades por unidad de densidad). Los metales que son particularmente apropiados para su uso incluyen acero (aleaciones), y metales ligeros, tales como aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio y, en particular aleaciones de titanio.
- 10 Las aleaciones de aluminio adecuadas se basan en elementos de aleación tales como cobre, cinc, magnesio, silicio, manganeso y litio. También pueden añadirse pequeñas cantidades de cromo, titanio, escandio, circonio, plomo, bismuto y níquel, así como hierro. Aleaciones de aluminio adecuadas incluyen las aleaciones de aluminio y cobre (serie 2xxx), aleaciones de aluminio y magnesio (de la serie 5xxx), aleaciones de aluminio, silicio y magnesio (serie 6xxx), aleaciones de aluminio, zinc y magnesio (serie 7xxx), aleaciones de aluminio y litio (serie 8xxx), así como
- 15 aleaciones de aluminio, magnesio y escandio. Las aleaciones de titanio adecuadas incluyen, pero no se limitan a aleaciones que comprenden Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, Ti-15Mo-3Al-3Nb, Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo, Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-6Al-4V y Ti-6Al-4V-2Sn. En otros aspectos, la invención no se limita a estratificados que utilizan estos metales, por lo que, si se desea, pueden utilizarse otros metales, por ejemplo cobre u otro metal estructural adecuado. El estratificado de la invención también puede comprender láminas de metal de diferentes aleaciones.
- 20 Un estratificado de fibra-metal según la invención estará generalmente formado por un número de láminas de metal y un número de capas de material compuesto reforzado con fibras, con la condición de que las propiedades de las capas de material compuesto reforzado con fibras y de las láminas de metal satisfagan las ecuaciones (1) a (3).

- Las capas exteriores del estratificado de fibra-metal pueden comprender láminas de metal y/o capas de material compuesto reforzado con fibras. El número de capas de metal se puede variar en un amplio intervalo y es al menos
- 25 una. En un estratificado de fibra-metal particularmente preferido, el número de capas de metal es de dos, tres o cuatro, entre cada una de los cuales se han aplicado, preferiblemente, capas de material compuesto reforzado con fibras. Dependiendo del uso pretendido y de los requisitos establecidos, el número óptimo de láminas de metal puede ser fácilmente determinado por la persona experta en la técnica. El número total de láminas de metal, en general, no excederá de 40, aunque la invención no se limita a estratificados con un número máximo de capas de metal, tales como éste. Según la invención, el número de láminas de metal está preferiblemente entre 1 y 30, y más preferiblemente entre 1 y 10, teniendo preferiblemente las láminas de metal una resistencia máxima a la tracción de al menos 0,25 GPa.
- 30

Para evitar que el estratificado se combe como resultado de tensiones internas, el estratificado según la invención puede estar estructurado simétricamente con respecto a un plano a través del centro del espesor del estratificado.

- 35 Configuraciones de estratificado de fibra-metal según la invención se obtienen fácilmente mediante la disposición de capas (alternantes) de compuesto reforzado con fibras, preferentemente en forma de preimpregnados, y al menos una lámina de metal. Los estratificados de fibra-metal pueden ser diseñados en disposiciones muy diferentes.

- Con referencia a la figura 1, se muestra un estratificado de fibra-metal según una realización, en el que el número total de capas es 3, y en el que las capas 1 y 3 comprenden una capa de metal y la capa 2 es una capa de material compuesto fibroso. Alternativamente, la capa 1 y la capa 3 comprenden una capa de material compuesto fibroso y la
- 40 capa 2 es una capa de metal. La capa 1 y la capa 3 pueden comprender el mismo metal o pueden ser de un tipo de metal diferente. La capa o capas de material compuesto fibroso pueden contener fibras en múltiples direcciones, así como diferentes tipos de fibras para lo cual al menos uno de los tipos de fibras en al menos una de la capa o capas de material compuesto fibroso cumple con los requisitos establecidos en las ecuaciones (1) a (3).

- 45 Con referencia a la figura 2, se muestra un estratificado de fibra-metal según otra realización, en el que el número total de capas es  $n$ , y en el que la capa 1 es una capa de metal y la capa 2 es una capa de material compuesto fibroso, que se alternará hasta la capa  $n-1$  y la capa  $n$ . Alternativamente, la capa 1 es una capa de material compuesto fibroso y la capa 2 es una capa de metal, que será alternante hasta la capa  $n-1$  y la capa  $n$ . Las capas de metal alternantes pueden ser del mismo metal o pueden ser de un tipo de metal diferente, y pueden tener diferentes
- 50 espesores. También, al menos una de las capas de material compuesto fibroso alternantes pueden contener fibras en múltiples direcciones, así como diferentes tipos de fibras, para lo que al menos uno de los tipos de fibras en al menos una de las capas de material compuesto fibroso cumple los requisitos establecidos en las ecuaciones (1) a (3) con respecto a la capa de metal adyacente, preferiblemente con el mayor espesor para la de metal. Según la invención, al menos una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras (por ejemplo, la capa
- 55 2) y una lámina de metal adyacente (por ejemplo, las capas 1 o 3) tiene que satisfacer las relaciones (1) a (3) en la que  $E_{lam}$  corresponde al módulo de Young a la tracción en  $kN/mm^2$  del estratificado total de fibra-metal que comprende todas las capas 1, 2, ...,  $n-1$ ,  $n$ . En el caso de que las capas de metal (1) y (3) difieran en espesor, la capa de metal más gruesa se selecciona preferiblemente en la combinación. En caso de que la capa exterior del estratificado sea una capa de material compuesto fibroso, esta capa necesita cumplir preferiblemente los requisitos
- 60 establecidos en las ecuaciones (1) a (3) con respecto a su capa de metal adyacente, a menos que otra capa de

metal, con su capa de material compuesto de fibras adyacentes ya cumpla con los requisitos. Si la capa exterior es de metal, debe cumplir preferiblemente los requisitos establecidos en las ecuaciones (1) a (3) con respecto a su capa de material compuesto fibroso adyacente, a menos que otra capa de metal con su capa de material compuesto fibroso adyacente ya cumpla los requisitos.

- 5 Los estratificados se producen preparando un apilamiento de material compuesto fibroso y láminas de metal en la secuencia ejemplificada en las figuras 1 y 2, por ejemplo en un molde plano o con una, dos o múltiples curvas. Después de la estratificación, la estructura global se cura a una temperatura adecuada para la resina matriz, preferiblemente una resina epoxi, por ejemplo en autoclave, y preferiblemente bajo vacío con el fin de expulsar el aire atrapado en el estratificado. Para la mayoría de las aplicaciones, lo más adecuado será una resina epoxi con una elevada temperatura de transición vítrea. Sin embargo, puede usarse cualquier resina epoxi. Las resinas epoxi son generalmente curadas a, o ligeramente por encima de, la temperatura ambiente, a una temperatura de aproximadamente 125 °C o a una temperatura de aproximadamente 175 °C. Después del curado bajo presión se obtiene un estratificado consolidado. Como se mencionó anteriormente, también es posible utilizar una resina termoplástica.
- 10
- 15 Otra producción preferida de un estratificado según la invención comprende más de un ciclo de curado. Con referencia a la figura 2, por ejemplo, puede producirse un estratificado realizando en primer lugar un estratificado que contenga 3 hasta n-2 capas en un ciclo de curado especializado, y después, en un segundo ciclo de curado ajustado, se conectan a este estratificado de dos capas de metal 1 y n por medio de una capa de material compuesto reforzado con fibras (2 y n-1) a cada lado con un contenido de volumen de fibra apropiado cumpliendo los requisitos de las ecuaciones (1)-(3).
- 20

### Ejemplos y Ejemplos Comparativos

- 25 La invención se ilustrará mediante varios Ejemplos. Los Ejemplos se comparan con algunos estratificados conocidos, es decir, estratificados que caen fuera de la zona limitada por las líneas 19, 50, 51, 54 y 20 para un estratificado según la invención, y por las líneas 19, 52, 53, 54 y 20 para un estratificado según una realización preferida, véanse la figura 8 y la figura 9.

### Ejemplos

Los estratificados investigados se conocen como:

- 30 FML-G-A-UD-4/3: un FML reforzado con fibras de vidrio S2 que tiene fibras unidireccionales en las capas de material compuesto reforzado con fibras orientadas en la dirección de la carga y una aleación 2024-T3 de aluminio como metal en las láminas de metal;
- FML-C-A-UD-4/3: un FML reforzado con fibras de carbono de alta resistencia que tiene fibras unidireccionales, en las capas de material compuesto reforzado con fibras, orientadas en la dirección de la carga y una aleación 2024-T3 de aluminio como metal en las láminas de metal;
- 35 FML-C-T-UD-4/3: un FML reforzado con fibras de carbono de alta resistencia (HS) que tiene fibras unidireccionales, en las capas de material compuesto reforzado con fibras, orientadas en la dirección de la carga y una aleación Ti-6Al-4V de titanio como metal en las láminas de metal;
- 40 FML-I-T-UD-4/3: un FML reforzado con fibras (con la rigidez entre fibras de vidrio de alto comportamiento y fibras de carbono de alto módulo) de módulo intermedio (IM) que tiene fibras unidireccionales, en las capas de material compuesto reforzado con fibras, orientadas en la dirección de la carga y una aleación Ti-6Al-4V de titanio como metal en las láminas de metal; y
- FML-G- A-CP-4/3: un FML reforzado con fibras de vidrio S2 que tiene capas cruzadas, en las capas de material compuesto reforzado con fibras, orientadas principalmente en la dirección de la laminación del metal y una aleación 2024-T3 de aluminio como metal en las láminas de metal.
- 45 Todos los estratificados analizados comprenden 4 láminas de metal y 3 capas de material compuesto reforzado con fibras intercaladas con las láminas de metal. Para poder comparar correctamente, cada grado de estratificado (es decir, que tengan el mismo metal y fibras) con el mismo espesor del metal tiene aproximadamente el mismo peso y una carga de funcionamiento correspondiente con un esfuerzo de 100 MPa tomado en  $V_f = 0,57$ .
- 50 Se desarrolló un procedimiento de análisis basado en numerosos ensayos de fatiga para las muestras con una muesca en el arranque de 5 mm por lo que la resistencia a la fatiga se definió como el número de ciclos necesarios para obtener una longitud de grieta en el metal de 20 mm.
- Los resultados se proporcionan en las figuras 3-7 para todos los estratificados a diferentes espesores de la lámina de metal y de la fracción de volumen de fibra en las capas reforzadas con fibra.

La figura 3 muestra la resistencia 10 a la fatiga con muesca en términos del número de ciclos de carga dinámica frente a la fracción 20 de volumen de fibra para un FML FML-G-A-UD-4/3 con diferentes espesores de la lámina de metal. Las curvas 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 son para espesores de la lámina de metal de 0,5 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, 1,5 mm, y 3,0 mm respectivamente. La línea 19 corresponde a  $V_f = 0,54$ .

- 5 La figura 4 muestra la resistencia 10 a la fatiga con muesca en términos del número de ciclos de carga dinámica frente a la fracción 20 de volumen de fibra para un FML FML-C-A-UD-4/3 con diferentes espesores de la lámina de metal. Las curvas 21, 22, 23, 24, 25 y 26 son para espesores de la lámina de metal de 0,7 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm y 4,0 mm respectivamente. La línea 19 corresponde a  $V_f = 0,54$ .

- 10 La figura 5 muestra la resistencia 10 a la fatiga con muesca en términos del número de ciclos de carga dinámica frente a la fracción 20 de volumen de fibra para un FML FML-C-T-UD-4/3 con diferentes espesores de la lámina de metal. Las curvas 31, 32, 33, 34 y 35 son para espesores de la lámina de metal de 0,9 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm y 3,0 mm respectivamente. La línea 19 corresponde a  $V_f = 0,54$ .

- 15 La figura 6 muestra la resistencia 10 a la fatiga con muesca en términos del número de ciclos de carga dinámica frente a la fracción 20 de volumen de fibra para un FML FML-IT-UD-4/3 con diferentes espesores de la lámina de metal. Las curvas 41, 42, 43, 44 y 45 son para espesores de la lámina de metal de 0,7 mm, 0,8 mm, 1,0 mm, 1,5 mm y 2,0 mm respectivamente. La línea 19 corresponde a  $V_f = 0,54$ .

- 20 Por último, la figura 7 muestra la resistencia 10 a la fatiga con muescas en términos del número de ciclos de carga dinámica frente a la fracción 20 de volumen de fibra para una FML FML-G-A-CP-4/3 con diferentes espesores de la lámina de metal. Las curvas 51, 52, 53, 54, 55 y 56 son para espesores de lámina de metal de 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm, 0,8 mm, 1,0 mm y 1,5 mm respectivamente. La línea 19 corresponde a  $V_f = 0,54$ .

Todos los resultados muestran una  $V_f$  óptima para cada espesor de la lámina de metal, por lo que el óptimo se desplaza disminuyendo la  $V_f$  para FML con láminas de metal más gruesas. El óptimo se corresponde con el valor máximo del número (ciclos) de resistencia 10 a la fatiga. También se muestra que un  $V_f$  demasiado bajo produce un comportamiento hasta fatiga menos óptimo. Por lo tanto, un valor mínimo para  $V_f$  es parte de la invención.

- 25 Los FML que muestran un valor máximo de resistencia a la fatiga (los máximos en las figuras 3-7) se seleccionaron y agruparon en las figuras 8 y 9. Los valores máximos seguían la línea 59, como se indica en las Figuras 8 y 9. Las líneas óptimas se corresponden con  $b = 0,58$  y  $c = 0,15$ , y con 0 (cero) para  $V_f < 0,15$ . Estas figuras muestran el parámetro  $60 = E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  en  $kN/mm^4$  frente a la fracción 20 de volumen de fibra. Estas figuras también representan gráficamente las relaciones (1) a (3) en la que la línea de puntos 50 y 51 en la figura 8 representa, resp., los límites superior e inferior de la relación (1), correspondiente al 90 % de los máximos comportamientos a fatiga de los estratificados. Las líneas de puntos 50 y 51 y la línea 54 representan los límites definidos por la reivindicación 1. Los estratificados correspondientes a la invención se encuentran dentro de la zona delimitada por las líneas 50, 19, 51, 54 y 20 (para  $V_f < 0,3$ ). La figura 9 representa un límite superior e inferior más ajustado de la relación (1), es decir, resp., la línea de puntos 52 y 53, que corresponde al 95 % de los máximos comportamientos a fatiga de los estratificados. Las líneas de puntos 52, 53 y la línea 54 representan los límites definidos por la reivindicación 2. Los estratificados según esta realización preferida caen dentro de la zona delimitada por las líneas 54, 52, 19, 53 y 20 (para  $V_f < 0,26$ ).

- 40 Estratificados de fibra-metal óptimos, es decir FML que tienen la más alta resistencia al agrietamiento bajo carga dinámica están todos situados dentro de los límites definidos por líneas de puntos 50, 51 y la línea 19, que representa la relación (2) y la línea 54, que representa la relación (3). Las realizaciones preferidas como se define en la reivindicación 2 están todas ellas situadas dentro de los límites definidos por las líneas de puntos 52, 53, la línea 54 y la línea 19. Los estratificados de fibra-metal no óptimas que están fuera del alcance de la presente invención caen fuera de la zona delimitada por las líneas de puntos 50, 51 (o 52, 53), la línea 54 y la línea 19.

### Ejemplos comparativos

- 45 Ejemplo Comparativo 1

En el documento EP 0322947B1, se describen con suficiente detalle dos estratificados que permiten calcular los resultados de las ecuaciones (1)-(3) según la invención.

- 50 El estratificado 1 (definido por ARALL 1) comprende 14 láminas de aleación 7075-T6 de aluminio que tienen cada una  $t_{metal} = 0,3$  mm. Entre cada capa de metal se aplica un material preimpregnado de aramida con un espesor de 0,2 mm y una  $V_f = 50$  %.

El estratificado 2 consiste en una lámina de aleación 2024-T3 de aluminio con un espesor  $t_{metal} = 4$  mm, intercalada entre dos láminas de ARALL 1 que contienen 3 láminas de aleación 7075-T6 de aluminio con espesor  $t_{metal} = 0,3$  mm. Entre cada lámina de metal de ARALL 1, y entre ARALL 1 y la lámina interior de aleación 2024-T3 se aplica un material preimpregnado de aramida con un espesor de 0,2 mm y una  $V_f = 50$  %.

Aunque el módulo de Young de las aleaciones de aluminio aplicadas no se divulga en el documento EP 0322947B1, este módulo de Young se ha tomado de MMPDS (DOT/FAA/AR-MMPDS-01), que da para una aleación 2024-T3 de aluminio un  $E_{\text{metal}} = 72,4$  GPa y para una aleación 7075-T6 de aluminio un  $E_{\text{metal}} = 71,0$  GPa. El módulo de elasticidad o módulo de Young de las fibras de aramida tampoco se divulgan explícitamente en el documento EP 0322947B1. Por tanto, se supondrá que la fibra de aramida aplicada tiene un módulo  $E_{\text{fibra}} = 125$  GPa. Para el cálculo de la rigidez  $E_{\text{comp}}$  de las capas de material compuesto, se requiere conocer la rigidez del sistema matriz aplicado, que no se divulga explícitamente en el documento EP 0 322 947. Se supondrá que la rigidez del sistema matriz es de 4 GPa.

Aunque el espesor del material preimpregnado de aramida se divulga en el documento EP 0322947B1 (0,2 mm) no está claro si éste es el espesor antes o después del proceso de curado en autoclave. Por lo tanto, se supone que el espesor mencionado corresponde al espesor de la preimpregnación curada.

Aplicando todos los datos de las características divulgadas explícitamente y asumidas razonablemente de la EP 0322947B1 en la ecuación (1) resulta para el estratificado 1 un valor de  $695$  N/mm<sup>4</sup> y para el estratificado 2 un valor de  $4$  N/mm<sup>4</sup>. En consecuencia, el estratificado 1 está por encima de la zona óptima reivindicada, mientras el estratificado 2 está por debajo de la zona reivindicada. El último valor se muestra en las fig. 8 y 9 como punto CE1 de los datos.

#### Ejemplo Comparativo 2

En el documento WO 2007/145512 A1 en la página 16, se describen tres estratificados combinados de un estratificado interior GLARE intercalado entre capas de aluminio gruesas.

El estratificado 1 consiste en un estratificado interior GLARE1-5/4-0,4 con una lámina 2024-T3 de aluminio con un espesor de 4 mm en ambos lados unidas a él con una película adhesiva (sin fibras).

El estratificado 2 es similar al estratificado 1, pero difiere sólo en el adhesivo aplicado entre el GLARE y las láminas exteriores de aluminio de 4 mm. En lugar de una película adhesiva se aplicó un preimpregnado estándar de vidrio S2.

El estratificado 3 es similar a los estratificados anteriores con la única diferencia de que en lugar de preimpregnado estándar entre el GLARE y el metal exterior con 4 mm de espesor, se aplicó preimpregnado estándar junto con película adhesiva. El contenido en volumen de fibra del preimpregnado estándar de vidrio S2 es  $V_f = 60$  % (pág. 16), que está fuera de la zona reivindicada de la presente invención. En consecuencia, los estratificados 1 y 2 quedarán fuera de la zona reivindicada por la invención.

Además debe mencionarse que no se divulgan ni el espesor del o de los preimpregnados de vidrio S2 aplicados ni su rigidez, ni el espesor del adhesivo aplicado ni su rigidez, ni el espesor, contenido de volumen de fibra  $V_f$  ni la rigidez de la capa de material compuesto entre el estratificado GLARE y las capas de aluminio exteriores con 4 mm de espesor.

En consecuencia, no se puede establecer que las ecuaciones (1)-(3) según la invención sean satisfechas por el estratificado 3 de WO 2007/145512 A1.

#### Ejemplo comparativo 3

El documento WO 2009/095381 A1 en la página 11 divulga un estratificado de dos láminas 2024-T3 de aluminio con un espesor de aproximadamente 0,2 mm, entre las que están dispuestas 8 capas reforzadas con fibras. Las capas reforzadas con fibra comprenden fibras UD de vidrio S2 que tienen  $V_f = 60$  % y cada capa tiene un espesor de 0,25 mm.

Con el fin de poder calcular los valores según las ecuaciones (1)-(3), se necesitan datos de las características que no se divulgan de manera explícita en el documento WO 2009/095381 A1. En particular, la rigidez de las capas reforzadas con fibras, y la rigidez del metal son insuficientes. Usando para la fibra de vidrio  $E_{\text{fibra}} = 88,5$  GPa, y los mismos valores mencionados antes para la rigidez del material matriz del material compuesto reforzado con fibras y el aluminio, es decir,  $E_{\text{matriz}} = 4$  GPa y  $E_{\text{metal}} = 72,3$  GPa, así como suponer lo mismo para los ejemplos anteriores con respecto al espesor de la capa de material compuesto, el cálculo del valor de la ecuación (1) da como resultado  $345$  N/mm<sup>4</sup>. Este valor se muestra en las fig. 8 y 9 como punto CE3 de los datos. El estratificado del documento WO 2009/095381 A1 no muestra propiedades óptimas de fatiga y es evidente que este estratificado está fuera de la zona reivindicada.

La Figura 10 muestra el comportamiento a fatiga de estratificados reforzados con fibras con diferentes fracciones de volumen de fibra, medido por el crecimiento de la grieta bajo cargas cíclicas para diferentes longitudes de grieta. El conocido estratificado reforzado con fibras se denomina GLARE3-4/3-0,5, que tiene capas de aluminio con un espesor de 0,5 mm. Los resultados para estos estratificados deberían compararse, por tanto, con la línea 52 de la fig. 7 (mismo espesor de metal). La Figura 10 muestra claramente que el conocido estratificado GLARE3-4/3-0,5 que utiliza material preimpregnado estándar (G3S) tiene una resistencia a la fatiga de 185.000 ciclos a una longitud de grieta de 20 mm. El preimpregnado estándar tiene una fracción de volumen de fibra nominal de aproximadamente 58

% . El valor del parámetro  $60 = E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  para el conocido estratificado GLARE3-4/3-0,5 que utiliza material preimpregnado estándar (G3S) es igual a  $162 \text{ kN/mm}^4$ .

Un estratificado según la invención (G3SO) tiene la misma configuración que G3S pero difiere en que a la capa de preimpregnado se ha añadido una capa adhesiva adicional. Los resultados de fatiga de este estratificado (con una fracción de volumen de aproximadamente 42,5 %) se muestran también en la figura 10 y muestra una resistencia a la fatiga de aproximadamente 330.000 ciclos, que es casi un factor 2 mayor que el estratificado conocido. En la Figura 7, el punto de datos para el estratificado G3SO debería estar situado cerca de la parte superior de la línea 52. El valor del parámetro  $60 = E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  para un estratificado que utiliza un preimpregnado G3SO es igual a  $110 \text{ kN/mm}^4$ . Según la invención, hay un óptimo en el comportamiento a la fatiga ya que al disminuir aún más la fracción de volumen de fibra, el comportamiento a la fatiga disminuirá de nuevo. De hecho, el estratificado G3SL tiene la misma colocación que los estratificados G3S y G3SO anteriores pero una fracción de volumen de fibra más reducida de aproximadamente un 20 %. El valor del parámetro  $60 = E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  para un estratificado que utiliza material preimpregnado G3SL es igual a  $40 \text{ kN/mm}^4$ . El estratificado G3SL muestra una resistencia a la fatiga reducida de aproximadamente 230.000 ciclos (fig.10). Los resultados obtenidos para estos estratificados se muestran también en la figura 8. Esta figura muestra claramente que la zona reivindicada entre las líneas 50, 51 y 54 muestra óptimo comportamiento a fatiga como el estratificado que usa preimpregnado G3SO, así como los máximos de la resistencia a la fatiga con muescas que se muestran en las figuras 3-7 entran todos dentro de este área. Estratificados conocidos que utilizan preimpregnados como G3SL y G3S están fuera del ámbito de la invención, es decir, por debajo del límite inferior (línea 51) para el estratificado que utiliza preimpregnado G3S y por encima del límite superior (línea 50) para un estratificado que utiliza preimpregnado G3SL.

**REIVINDICACIONES**

1. Un estratificado de fibra-metal de capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas, comprendiendo el estratificado una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y una lámina de metal adyacente, en cuya combinación las propiedades satisfacen las siguientes relaciones:

$E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  tiene un valor entre un límite inferior dado por

$$a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))} \text{ con } b = 0,36 \text{ y } c = 0,3 \tag{1a}$$

10 y cero cuando  $V_f \leq 0,3$ , (1b)

y un límite superior dado por

$$a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))} \text{ con } b = 0,88 \text{ y } c = 0 \tag{1c}$$

15  $0,10 \leq V_f < 0,54$  (2)

$$0 < E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 400 * V_f \text{ (kN/mm}^4\text{)} \tag{3}$$

20 en la que  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ; y

$E_{comp}$  = módulo de Young a la tracción de la capa de material compuesto reforzado con fibras en  $\text{kN/mm}^2$  en la combinación, tomado en la dirección de la más alta rigidez de la capa de material compuesto

25  $E_{lam}$  = módulo de Young a la tracción del estratificado total de fibra-metal en  $\text{kN/mm}^2$ , tomado en la misma dirección que  $E_{comp}$

$E_{metal}$  = módulo de Young a la tracción de la lámina de metal en  $\text{kN/mm}^2$  en la combinación

30  $t_{metal}$  = espesor de la lámina de metal en mm en la combinación

$V_f$  = fracción de volumen de fibra de la capa de material compuesto reforzado con fibras en la combinación

35 2. Estratificado de fibra-metal según la reivindicación 1, en el que  $a = 1.200 \text{ kN/mm}^4$ ; el parámetro límite inferior  $b = 0,41$  y  $c = 0,26$ , y el límite inferior es cero cuando  $V_f < 0,26$ ; y el parámetro límite superior  $b = 0,85$  y  $c = 0,02$ , en el que  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 400 * V_f \text{ (kN/mm}^4\text{)}$  y, más preferido,  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 300 * V_f \text{ (kN/mm}^4\text{)}$ , y lo más preferido  $< 200 * V_f \text{ (kN/mm}^4\text{)}$ .

40 3. Estratificado de fibra-metal según la reivindicación 1 o 2, en el que la fracción de volumen de fibra de la capa de material compuesto reforzado con fibras satisface de  $0,15 < V_f < 0,50$ , más preferiblemente  $0,20 < V_f < 0,45$  y lo más preferiblemente  $0,20 < V_f < 0,40$ .

4. Estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras de diferentes espesores, y/o que comprende una capa de material compuesto reforzado con fibras con al menos dos fibras diferentes, y/o que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras que difieren en la fibra.

45 5. Estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que el espesor de las láminas de metal es de  $0,4 \text{ mm} < t_{metal} \leq 4 \text{ mm}$ , preferiblemente  $0,5 \text{ mm} \leq t_{metal} \leq 2 \text{ mm}$ , y más preferiblemente entre  $0,6 \text{ mm} \leq t_{metal} \leq 1,5 \text{ mm}$ .

50 6. Estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que las fibras en las capas de material compuesto reforzado con fibras se extienden en múltiples direcciones diferentes, más preferiblemente en al menos dos direcciones mutuamente diferentes y lo más preferiblemente se extienden principalmente en una dirección.

7. Estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,20 \leq V_f < 0,50$  y el espesor de las láminas de metal es de  $0,4 \text{ mm} < t_{metal} \leq 2 \text{ mm}$  y más preferiblemente satisface  $0,30 \leq V_f < 0,50$  y el espesor de las láminas de metal es de  $0,5 \text{ mm} < t_{metal} \leq 1,2 \text{ mm}$ .

8. Estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, comprendiendo el estratificado un doblador plano o curvado.

9. Montaje de un estratificado de fibra-metal según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes y un elemento adicional, estando el elemento adicional conectado al estratificado de fibra-metal mediante una capa de unión, que comprende un adhesivo y/o un material compuesto reforzado con fibras, o estando conectado por medios de fijación mecánicos.

5 10. Uso de un montaje según la reivindicación 9 para proporcionar una estructura resistente a la fatiga.

11. Procedimiento para obtener el espesor de la lámina de metal y la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras en un estratificado de fibra-metal que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras y láminas de metal mutuamente unidas con el fin de obtener propiedades de fatiga óptimas del estratificado de fibra-metal, comprendiendo el procedimiento la selección de una combinación de una capa de material compuesto reforzado con fibras y una lámina de metal adyacente, seleccionando uno de los espesores de la lámina de metal o de la fracción de volumen de fibra, y calculando la correspondiente fracción de volumen de fibra o espesor de lámina de metal que satisface las siguientes relaciones:

$E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2)$  tiene un valor entre un límite inferior dado por

15  $a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))}$  con  $b = 0,36$  y  $c = 0,3$  (1a)

y cero cuando  $V_f \leq 0,3$ , (1b)

y un límite superior dado por

20  $a * (V_f - c)^{(b/(V_f - c))}$  con  $b = 0,88$  y  $c = 0$  (1c)

$0,10 \leq V_f < 0,54$  (2)

25  $E_{lam} * E_{comp} / (E_{metal} * t_{metal}^2) < 400 * V_f$  (kN/mm<sup>4</sup>) (3)

en la que  $a = 1.200$  kN/mm<sup>4</sup>; y

30  $E_{comp}$  = módulo de Young a la tracción de la capa de material compuesto reforzado con fibras en kN/mm<sup>2</sup> en la combinación, tomado en la dirección de la más alta rigidez de la capa de material compuesto

$E_{lam}$  = módulo de Young a la tracción del estratificado total de fibra-metal en kN/mm<sup>2</sup>, tomado en la misma dirección que  $E_{comp}$

35  $E_{metal}$  = módulo de Young a la tracción de la lámina de metal en kN/mm<sup>2</sup> en la combinación

$t_{metal}$  = espesor de la lámina de metal en mm en la combinación

$V_f$  = fracción de volumen de fibra de la capa de material compuesto reforzado con fibras en la combinación

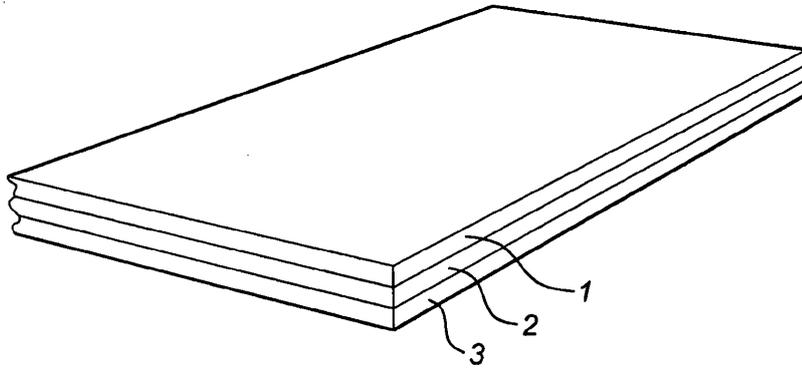
40 12. Procedimiento según la reivindicación 11, en el que  $a = 1.200$  kN/mm<sup>4</sup>; el parámetro límite inferior  $b = 0,41$  y  $c = 0,26$ , y el límite inferior es cero cuando  $V_f < 0,26$ ; y el parámetro límite superior  $b = 0,85$  y  $c = 0,02$ .

13. Procedimiento según la reivindicación 11 o 12, que comprende capas de material compuesto reforzado con fibras de diferentes espesores entre capas de metal.

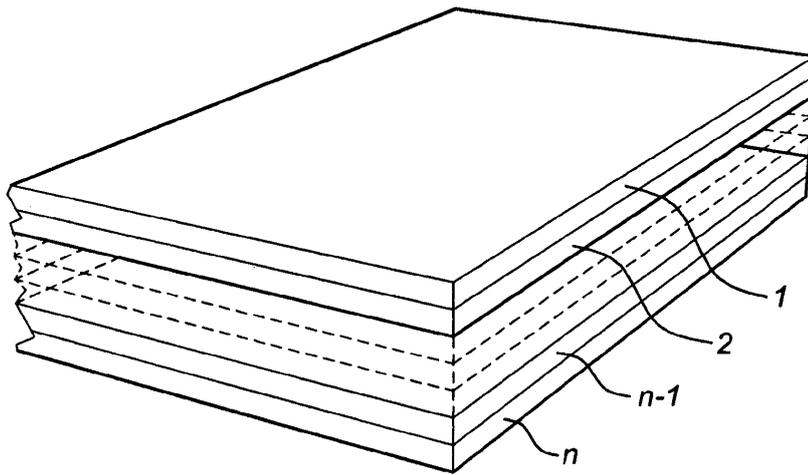
45 14. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 11-13, en el que el espesor de las láminas de metal es inferior a 4 mm, preferiblemente inferior a 2 mm y más preferiblemente entre 0,6 y 1,5 mm.

15. Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 11-14, en el que la fracción de volumen de fibra de las capas de material compuesto reforzado con fibras satisface  $0,20 < V_f < 0,50$  y el espesor de las láminas de metal es de  $0,4 \text{ mm} < t_{metal} \leq 2 \text{ mm}$

50



*Fig. 1*



*Fig. 2*

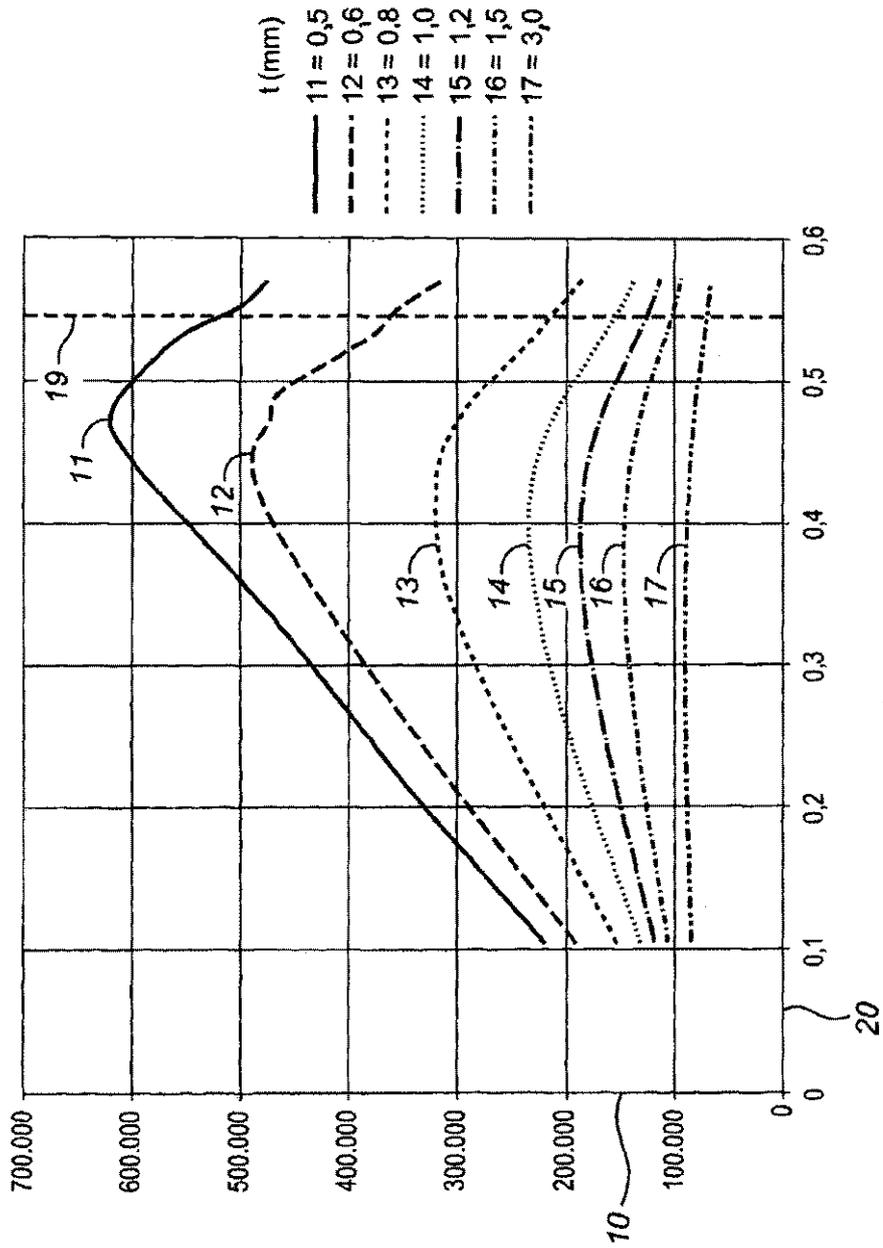


Fig. 3

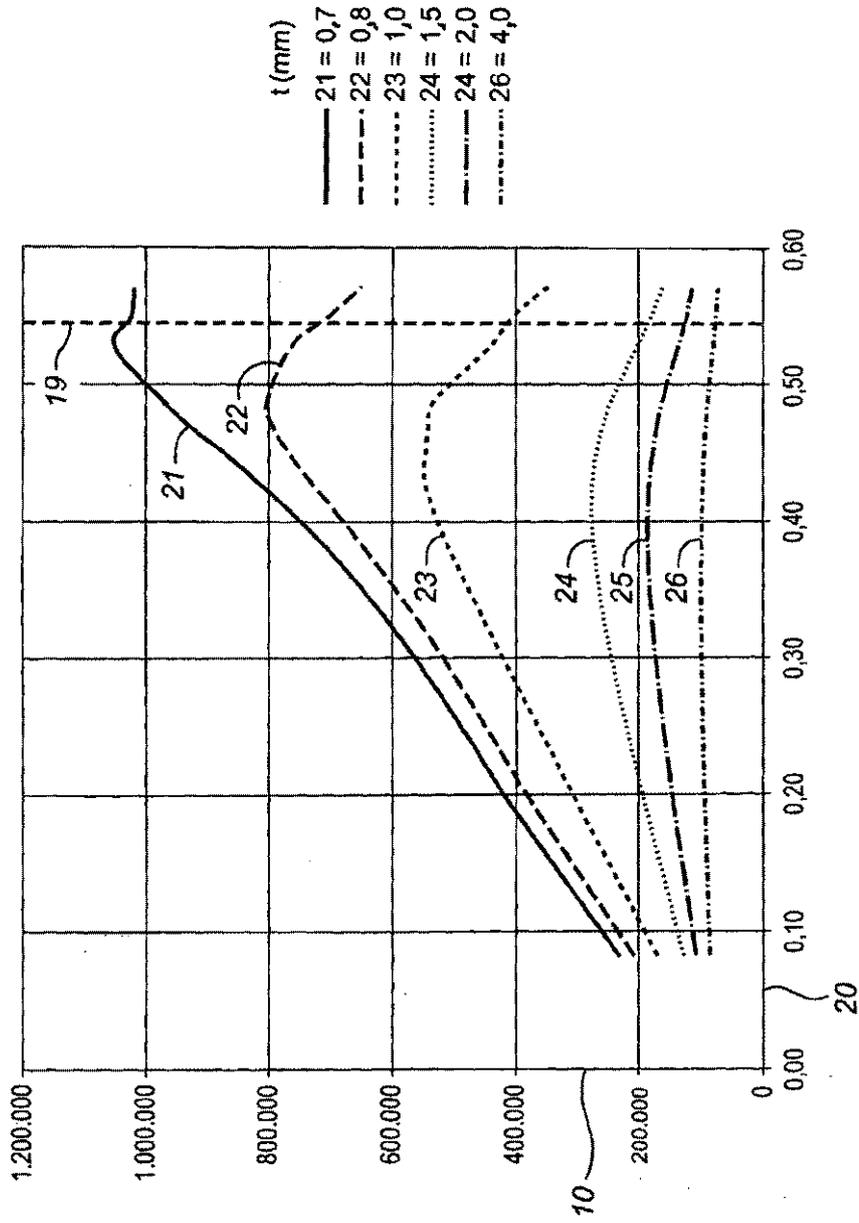


Fig. 4

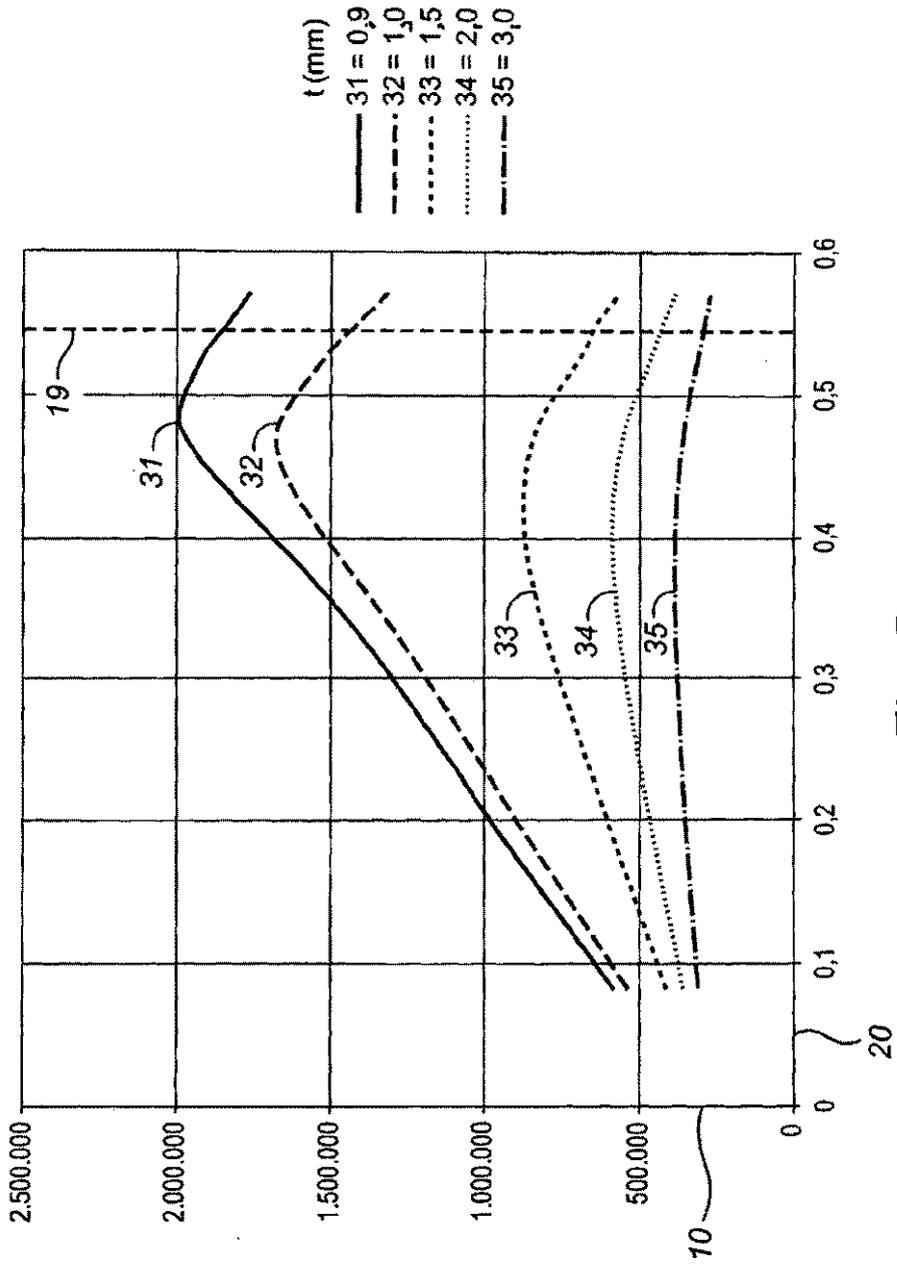


Fig. 5

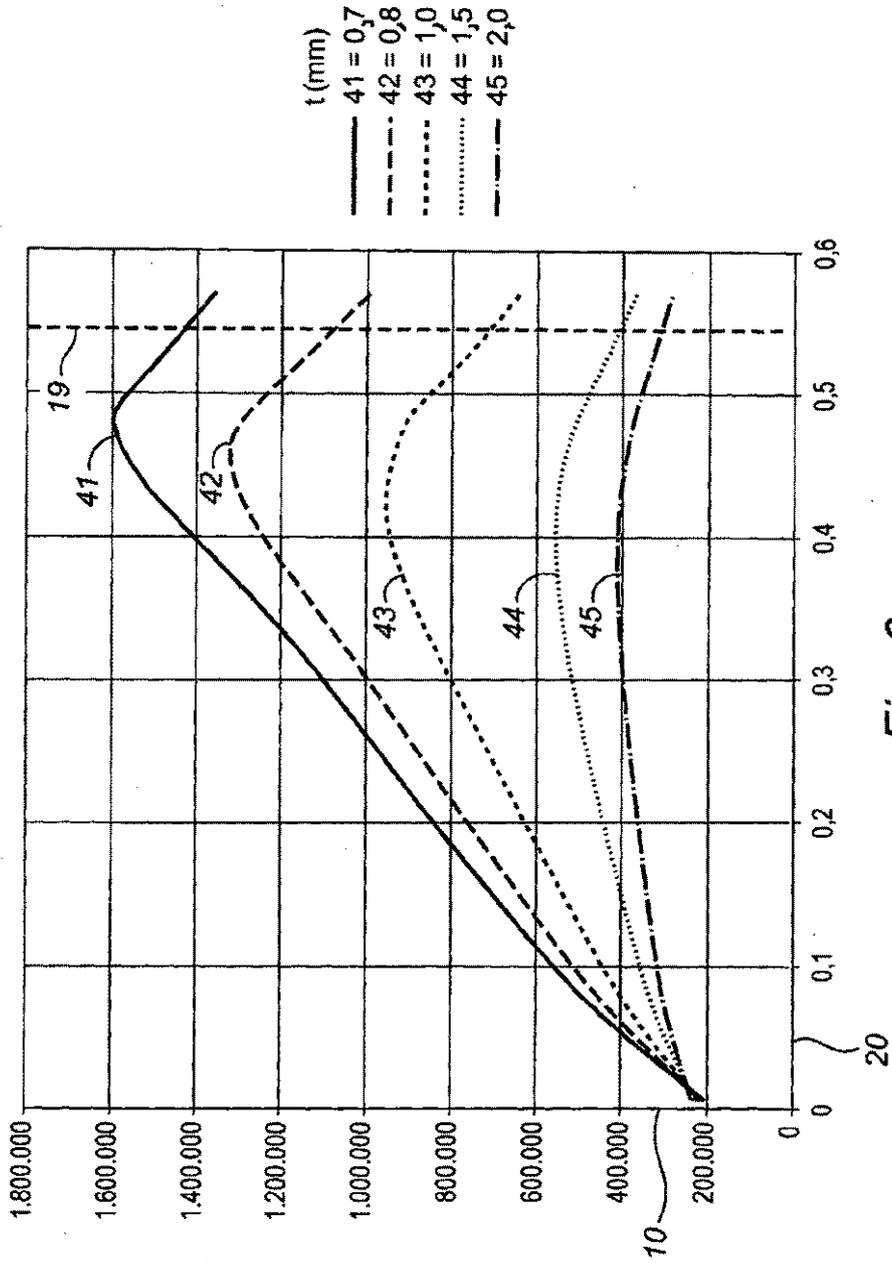


Fig. 6

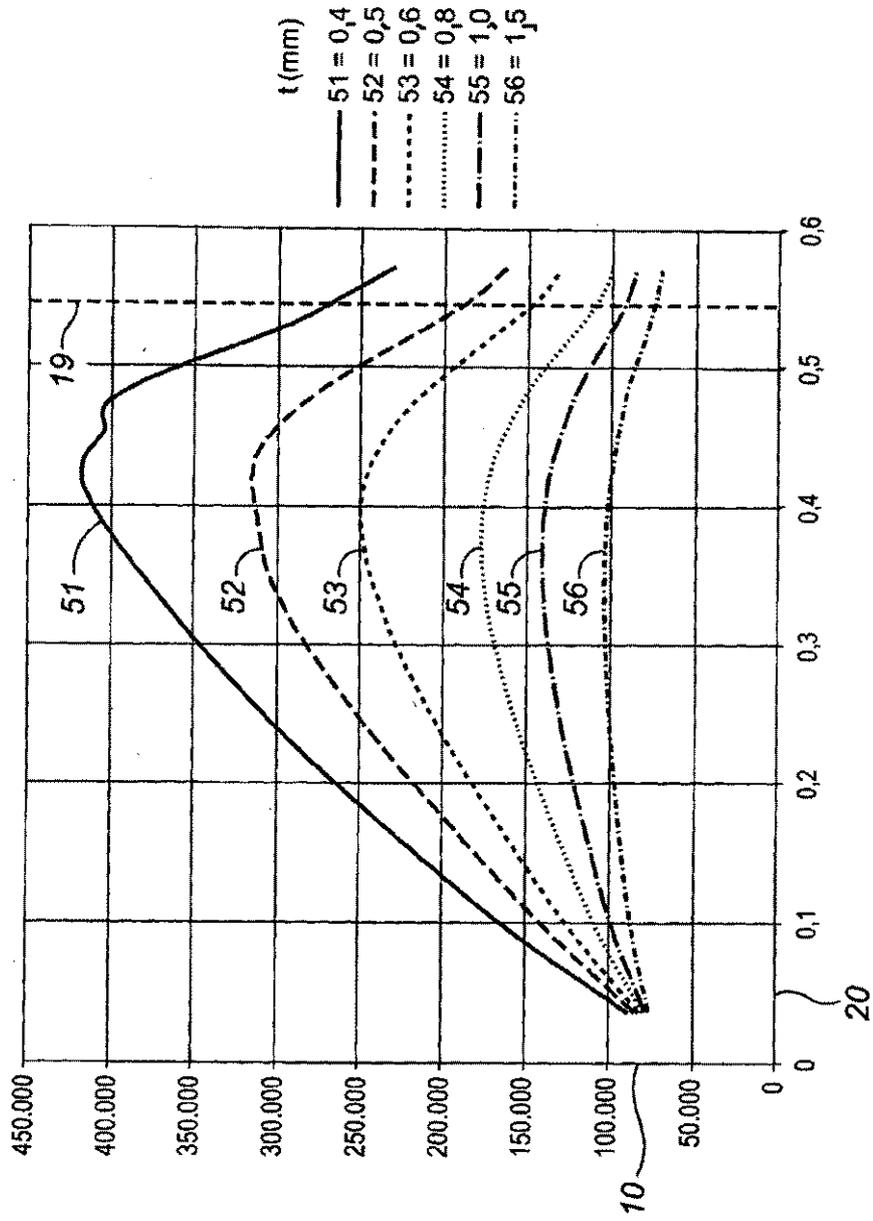


Fig. 7

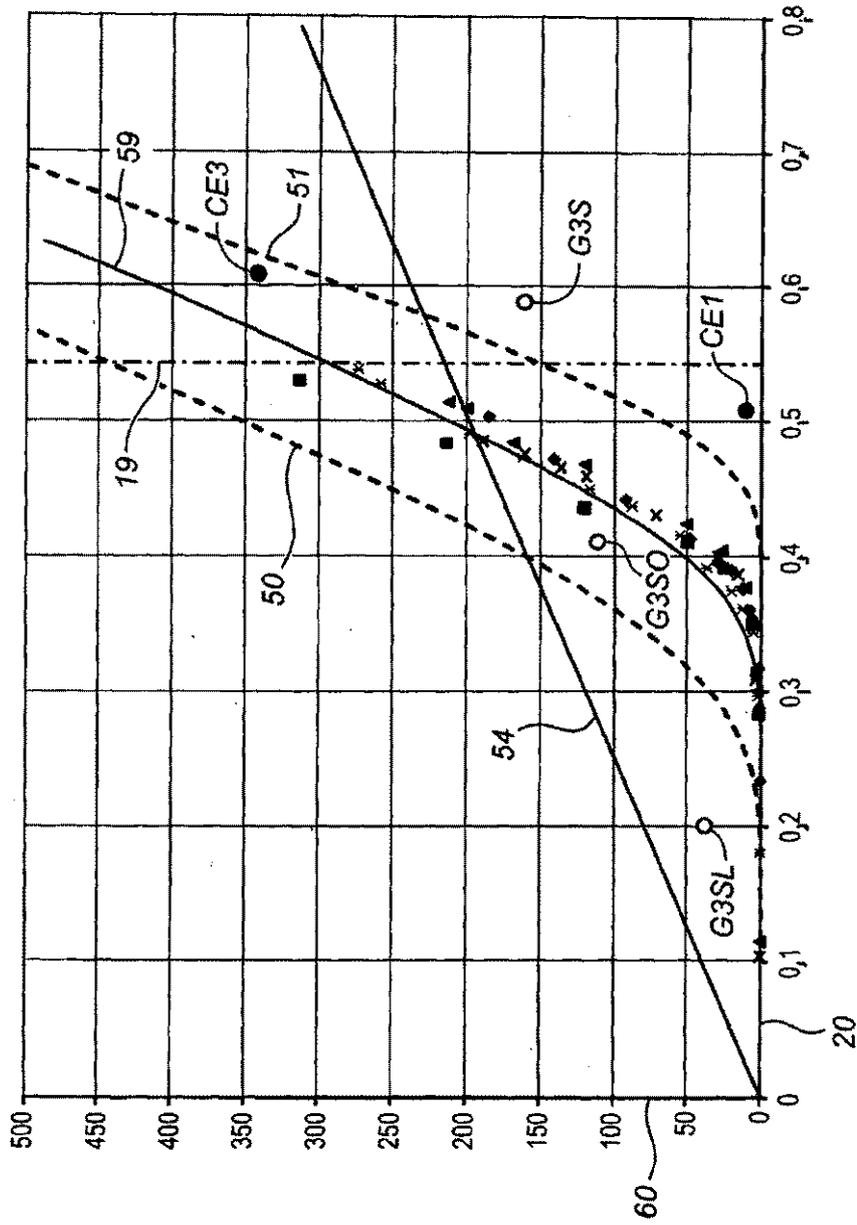


Fig. 8

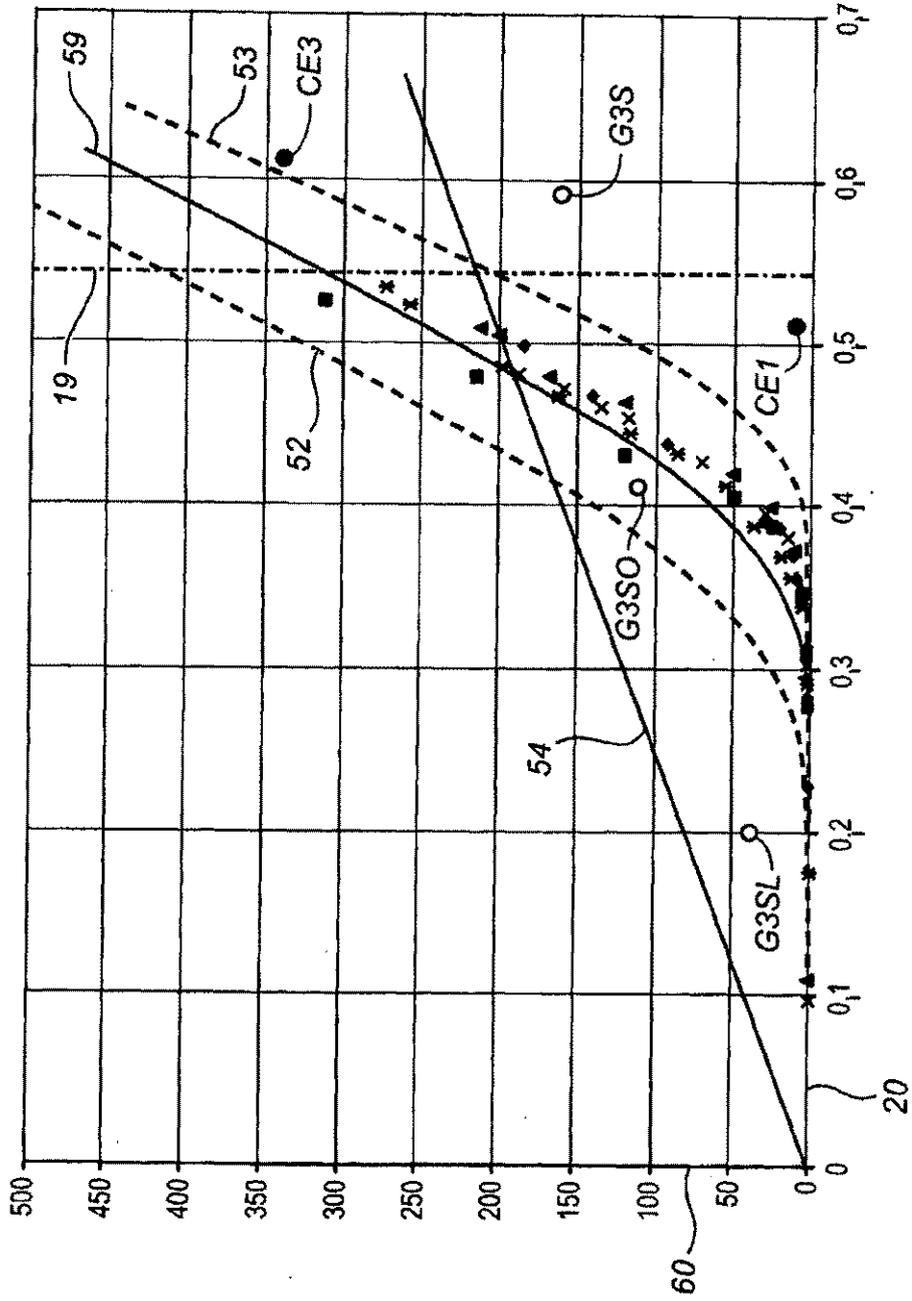


Fig. 9

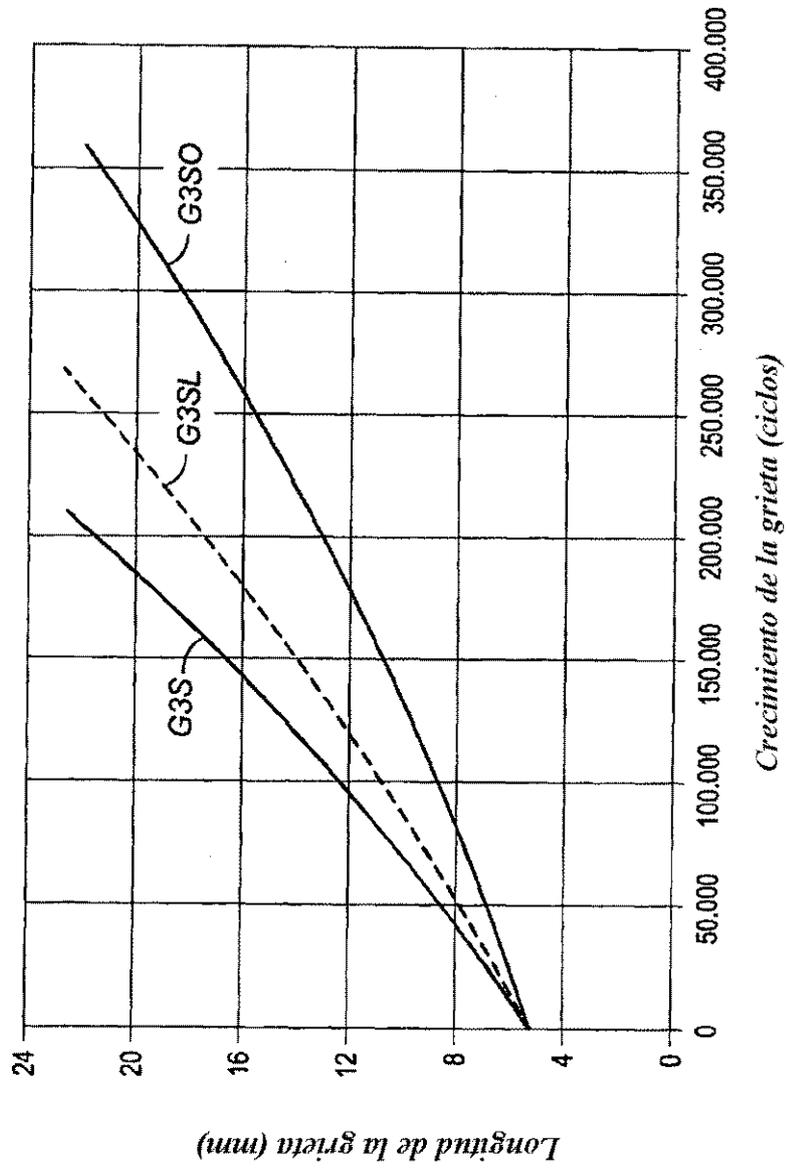


Fig. 10