

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 424 153**

51 Int. Cl.:

**G06F 17/50** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2005 E 05757421 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.05.2013 EP 1782297**

54 Título: **Modelizado de aplastamiento**

30 Prioridad:

**02.07.2004 GB 0414992**  
**31.08.2004 GB 0419292**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**27.09.2013**

73 Titular/es:

**GENUITY LIMITED (100.0%)**  
**The Old Hospital, Ardingly Road**  
**Cuckfield, West Sussex RH17 5HF, GB**

72 Inventor/es:

**COLES, IAN;**  
**BARNES, GRAHAM;**  
**ROBERTS, RICHARD y**  
**ANDERSON, JAMES**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 424 153 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**

Modelizado de aplastamiento

**Campo de la invención**

5 Esta invención está relacionada con métodos, aparatos y software para modelizar el comportamiento de materiales que se aplastan particularmente, pero no exclusivamente, en el contexto de piezas de material compuesto de la carrocería de vehículos en caso de impacto.

**Antecedentes**

10 Durante mucho tiempo se ha reconocido que los materiales compuestos reforzados con fibra, particularmente los compuestos de fibra de carbono tienen un gran potencial para revolucionar la industria automotriz. Es bien sabido que los materiales compuestos son muy ligeros en comparación con sus equivalentes de metal, incluso el aluminio, y se pueden conformar hasta formas complejas que pueden hacer el mismo trabajo que muchos materiales estampados metálicos soldados.

15 Los materiales compuestos también tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de energía durante los impactos, lo que los hacen ideales para aplicaciones de automoción, ferrocarril o civiles. Por ejemplo, mientras que el acero sólo puede absorber hasta 20 kilojulios por kilogramo y el aluminio aproximadamente 30 kilojulios por kilogramo, los materiales compuestos de carbono puede absorber hasta 80 kilojulios por kilogramo.

20 Además, a diferencia de las estructuras metálicas, el material aplastado tiene muy poca resistencia residual después de que ha absorbido la energía. En cambio, el material compuesto se transforma esencialmente en pequeños trozos de desechos y fibras débilmente conectadas después de que ha sido aplastado, lo que significa que se requiere menos espacio que una estructura metálica equivalente. Esto se debe a que en una estructura metálica se debe proporcionar espacio en zonas designadas de arrugamiento para dar cabida al metal pandeado.

25 Por lo tanto, existe un importante aliciente para el uso de materiales compuestos, tales como los compuestos de fibra de carbono en los vehículos de producción en masa. Sin embargo, hasta la fecha, sólo se han utilizado en aplicaciones muy limitadas, tal como los coches deportivos de alta gama, deportes de motor y piezas pequeñas no críticas de coches de producción en masa.

30 Dos importantes desventajas actuales de los materiales compuestos es que son relativamente costosos y tienen largos tiempos de ciclo de fabricación. Sin embargo, todavía queda un importante obstáculo para su uso generalizado en la industria de la automoción es la capacidad de modelizar sus prestaciones en un impacto. Esto por supuesto es esencial para poder diseñar vehículos que sean tan seguros como sea posible y que se comporten de una manera predecible en el caso de un choque. Aunque se pueden llevar a cabo pruebas de prestaciones en choques mediante la construcción de prototipos, esto es extremadamente caro y solo es prácticamente factible en las últimas fases de diseño para probar el diseño básico y calibrar los sistemas de restricción. Durante las primeras etapas del diseño de vehículos hechos de metal, se utilizan análisis de elementos finitos para modelizar el comportamiento y la interacción de las diversas piezas metálicas y predecir sus prestaciones en caso de impacto. Esto significa que los diseños se pueden proponer, probar y modificar utilizando técnicas de modelizado por ordenador con mucha menos dependencia de la producción y pruebas en costosos prototipos.

40 Sin embargo, este planteamiento no funciona actualmente para materiales que se pueden aplastar, tal como los materiales compuestos. La razón de esto es que los materiales compuestos absorben energía por un mecanismo muy diferente a las estructuras metálicas. Las estructuras metálicas absorben energía por el plegado plástico del metal, iniciado por pandeo local del material, que se puede caracterizar por una curva de esfuerzo frente a deformación con un buen fin. En el límite, el fallo final, que puede ser desgarro o fractura frágil, tiene como resultado que el elemento no es capaz de transferir carga, aunque su volumen inicial queda esencialmente sin cambios.

45 A escala microscópica, sin embargo, algunos materiales, tales como los materiales compuestos, absorben energía por el aplastamiento local del material, por agrietamiento de matriz, pandeo y fractura de fibras, calentamiento por rozamiento, etc. Visto en macroescala, el material se aplasta esencialmente o es consumido por el impacto de manera continua, y el volumen del material se reduce a medida que el material estructural se convierte en desechos.

50 Es ampliamente reconocido en la técnica que no existe una manera satisfactoria para modelizar las prestaciones de aplastamiento de los materiales compuestos. Las técnicas existentes de análisis por elementos finitos como se demuestra en "Axial and Lateral Impact Prediction of Composite Structures Using Explicit Finite Element Analysis" Actas del Congreso y la Exposición Internacional de Ingeniería Mecánica, 17-22 de noviembre de 2002 de Ari G. Caliskan tienden a tratar los elementos de materiales compuestos considerando todo el elemento, o capas independientes del mismo, como que mantienen su integridad hasta que se llega al valor apropiado de esfuerzo de fallo, después de lo cual la capa o elemento se suprimen del análisis, o el elemento o capa se suprimen del análisis en un periodo de tiempo predefinido.

5 En un ejemplo típico, esto podría tener como resultado que el elemento se suprimiera con sólo el 5% de su longitud original de orilla comprimida. Los cálculos convencionales por elementos finitos esencialmente no pueden hacer frente a grandes cambios en el volumen y por lo tanto hacen fallar catastróficamente al elemento cuando en realidad el volumen sin impacto de material aún tenía una significativa capacidad para absorber energía. Esto tiene el efecto de que los resultados de los análisis sobre la base de tales técnicas no se ponen en correlación satisfactoriamente con los resultados experimentales reales, de tal manera que se puede confiar en ellos para predecir las prestaciones de estructuras p. ej. automóviles en caso de un impacto.

10 Este es claramente un grave inconveniente de las técnicas convencionales y, en la práctica, significa que no se utilizan materiales compuestos o, en los pocos casos en que se utilizan, ya sea la estructura debe tener suficiente ingeniería para asegurar el nivel mínimo requerido de prestaciones, o que se necesitan grandes prototipos y pruebas con el fin de evaluar sus prestaciones, que por supuesto consumen demasiado tiempo y son caros.

Existe la necesidad, por tanto, de poder predecir de manera fiable las prestaciones de los materiales compuestos durante un impacto.

### Compendio de la invención

15 Cuando se ve desde un primer aspecto, la presente invención proporciona un método implementado en ordenador para la determinación de la resistencia a impactos de una estructura según la reivindicación 1.

Cuando se ve desde un segundo aspecto, la invención proporciona software informático para ejecutar el método.

Cuando se ve desde un aspecto adicional, la invención proporciona un aparato de procesamiento de datos programado para ejecutar el método.

20 Los inventores han reconocido que durante un aplastamiento se puede hacer una aproximación del modo de fallo real de los materiales que se pueden aplastar como que se da una resistencia en curso por todo el consumo continuo del elemento o capa en la parte frontal de aplastamiento en lugar de dejar que el elemento o capa en su conjunto sufran un único fallo rápido.

25 Los inventores se han dado cuenta de que el planteamiento según la invención da unos resultados mucho más fiables y precisos en circunstancias en las que el material experimenta aplastamiento.

30 Debe apreciarse que la fuerza de resistencia devuelta para el elemento o capa no es el esfuerzo máximo de fallo, sino que es un valor algo inferior que se calcula a partir de la teoría de materiales o se determina empíricamente. Para dar un ejemplo específico, de un material compuesto de carbono típico de alta resistencia, tal como el T300, en un sistema de resina endurecida el esfuerzo máximo de compresión es del orden de 600 newtons por milímetro cuadrado (N/mm<sup>2</sup>). Sin embargo, si el material se aplasta continuamente, la resistencia al objeto impactante es del orden de 100 N/mm<sup>2</sup> es decir, aproximadamente 1/6 del valor máximo de resistencia a la compresión.

35 La invención por lo tanto añade con efectividad un nuevo modo de fallo para los elementos que se determinan que son los que en realidad experimentan aplastamiento, es decir devuelve a fuerza de resistencia por toda la longitud consumida del elemento. La parte frontal de aplastamiento puede ser simplemente la cara delantera de la barrera que impacta en la estructura aunque esto no es esencial y la parte frontal de aplastamiento puede definirse en cambio en otro lugar - por ejemplo, en una relación fija con respecto a la barrera.

40 El elemento o capa que se determina que está fallando por aplastamiento puede suprimirse, la resistencia en curso se aplica a uno o más elementos o capas adyacentes del elemento o la capa suprimidos, y/o a cualquier otra parte de apoyo de carga de la estructura. Preferiblemente, la parte de apoyo de carga es una parte del elemento o capa que se está aplastando. Por ejemplo, el elemento o capa podrían dimensionarse o definirse de nuevo (por ejemplo, dividiendo), la resistencia en curso se distribuye por cada nuevo elemento o capa. En ambas alternativas precedentes la barrera se trata efectivamente como que es impenetrable (salvo posiblemente porque se permite una mínima penetración para evitar dificultades de cómputo en la frontera). Los nodos del elemento o capa adyacentes a la barrera tienen impedido, por tanto, pasar a través. Sin embargo, ambas posibilidades se deben contrastar con elementos finitos convencionales en los que el análisis de barreras rígidas se tratan como elementos impenetrables y el análisis de elementos o capas simplemente se comprimen contra la barrera hasta que se llega al esfuerzo de fallo y el elemento o capa se suprime sin ningún efecto residual.

45 En unas realizaciones preferidas actualmente de la invención, la parte frontal de aplastamiento tiene permitido progresar a través del elemento o capa de modo que el espacio ocupado por el elemento o capa "pasa a través" de la parte frontal de aplastamiento.

50 La resistencia en general no será un valor fijo sino que en cambio puede ser una función de uno o más parámetros relacionados con el elemento o capa. En un ejemplo preferido la resistencia es una función del grosor del elemento o capa que se está aplastando a lo largo de la parte frontal de aplastamiento. Además o como alternativa, la resistencia preferiblemente depende del área de contacto en la parte frontal de aplastamiento. Preferiblemente para un elemento dado el valor real de la fuerza de resistencia es una función constante del área de contacto. En el caso

más simple la fuerza de resistencia podría ser directamente proporcional al área de contacto, aunque esto no es esencial. Además o como alternativa, cuando el material que se puede aplastar es un material compuesto, la resistencia puede determinarse como una función de la distribución de las capas del material compuesto, por ejemplo, el orden de las capas.

- 5 Por otra parte en las realizaciones preferidas actualmente de la invención la resistencia al aplastamiento es también una función de uno o más parámetros dinámicos relacionados con el impacto, tales como la velocidad y/o el ángulo con el que el objeto impactante golpea con el elemento o capa en cuestión o la cantidad de rotación impartida a él.

- 10 Las variaciones con el elemento/capa y/o los parámetros dinámicos se puede determinar por teoría, empíricamente o ambos. Incluso si estas variaciones se determinan teóricamente, esto no implica que el valor base correspondiente se determine así y viceversa. En la práctica, se espera que por lo menos la variación de la resistencia al aplastamiento con el ángulo se determinará empíricamente ya que esto es muy dependiente del entramado de una capa o de cada una de las capas de un material compuesto.

- 15 Preferiblemente un conjunto de elementos finitos de la estructura se designa como susceptible de aplastamiento. El conjunto podría comprender todos los elementos de la estructura. Sin embargo, el solicitante se ha dado cuenta por experiencia empírica que sólo experimentará aplastamiento una zona relativamente pequeña de una estructura de materiales compuestos en las inmediaciones de un objeto impactante. En unas realizaciones preferidas, por lo tanto, sólo se designa un subconjunto de elementos como susceptible de aplastamiento, definiendo de ese modo una zona de aplastamiento. Estos elementos tienen permitido de este modo fallar a través del novedoso modo de aplastamiento de la presente invención y por lo tanto necesitarán datos que permitan calcular su resistencia en este modo de fallo. Los elementos fuera de la zona de aplastamiento no tendrán la opción de fallar por aplastamiento. Sin embargo, esto significa que no es necesario establecer datos que permitan determinar su resistencia al fallo. Claramente esto es beneficioso cuando se utilizan datos empíricos para medir la resistencia exhibida durante el aplastamiento ya que elimina la necesidad de establecer datos para las zonas fuera de la zona de aplastamiento.

- 25 Cuando se determine de acuerdo con la invención que un elemento finito en particular se encuentra en el régimen de aplastamiento, el análisis convencional por elementos finitos se suspende a favor del novedoso modo de fallo de aplastamiento indicado en esta memoria. El análisis convencional por elementos finitos podría ser simplemente suspendido - en otras palabras, los cálculos del análisis convencional por elementos finitos simplemente no se llevarían a cabo para el elemento o capa en particular. En por lo menos algunas realizaciones preferidas, sin embargo, los cálculos convencionales por elementos finitos también se llevan a cabo en paralelo, de modo que el análisis revierte a estos en el caso de que algún elemento se calcule como que va a tener un fallo debido a otro modo de fallo convencional, tal como desgarró, esfuerzo o fallo entre láminas en cualquier momento mientras el elemento se está aplastando. Para dar un ejemplo, si la fuerza de resistencia al aplastamiento da lugar a fuerzas de flexión muy grandes entonces un elemento podría fallar como resultado de esfuerzos de tracción en lugar de ser aplastada.

- 35 Si la fuerza que empuja a un elemento a través de la parte frontal de aplastamiento no es suficiente para superar la fuerza de resistencia calculada según esta invención, el elemento puede volver efectivamente al análisis convencional por elementos finitos. Debe apreciarse sin embargo que el elemento podría pasar de nuevo a través de la parte frontal de aplastamiento en una etapa posterior, como dictan los cálculos del análisis por elementos finitos.

- 40 Cuando el análisis revierte a cálculos convencionales por elementos finitos, el elemento o capa en cuestión puede ser considerado a partir de ese momento como que no es capaz de ser aplastado o tener una degradación de la capacidad de aplastamiento. Por ejemplo, la fuerza de resistencia del elemento o capa en cuestión podría reducirse, a los efectos de cualquier futuro aplastamiento, en proporción a la cantidad del mismo, que previamente se había "consumido" durante la anterior fase de aplastamiento.

- 45 Tal como se prefiere, cuando la parte de apoyo de carga es una parte de la capa o elemento que se está aplastando, la parte de apoyo de carga podría ser todo el elemento o la capa, es decir, se podría concebir que la fuerza de resistencia se aplicara como una fuerza distribuida a través de elemento o la capa. Sin embargo, para que haya consistencia con el análisis normal por elementos finitos, se prefiere aplicar la fuerza a los nodos individuales del elemento de modo que los nodos comprendan la parte de apoyo de carga. En algunas realizaciones la fuerza se divide en partes iguales entre los nodos. En otras realizaciones la fuerza puede estar predispuesta hacia uno o más de los nodos. La fuerza se divide preferiblemente entre los nodos que han pasado a través de la parte frontal de aplastamiento y los nodos que no, en proporciones según la cantidad del elemento por área o distancia de penetración que ha pasado a través de la parte frontal de aplastamiento. Para dar un ejemplo, si el 70% del elemento ha pasado a través de la parte frontal de aplastamiento, un 70% de la fuerza calculada se aplicaría a los nodos que aún no hayan pasado a través.

- 55 La resistencia al aplastamiento que se considera que puede ofrecer el elemento o la capa, como se ha mencionado anteriormente, se puede determinar utilizando la teoría de materiales. Sin embargo, los mecanismos internos de trabajo durante el aplastamiento son a menudo sumamente complejos. Por ejemplo, en materiales compuestos con fibras, dependen entre otras cosas del tipo y tamaño de las fibras, las propiedades de la resina, el ciclo de curación y el estilo de entramado. Esta complejidad es una de las razones por la que han fallado los intentos por modelizar el

- 5      aplastamiento en el pasado. Sin embargo, uno de los puntos fuertes de la presente invención es que no es necesario calcular o ni siquiera entender los mecanismos internos de respuesta ya que se ha reconocido que para un conjunto dado de condiciones macroscópicas (área de contacto con el objeto impactante, velocidad, ángulo de impacto, etc.) la resistencia al aplastamiento es un único valor macroscópico. Este valor se puede obtener por lo tanto empíricamente realizando pruebas en muestras pequeñas (conocidas en la técnica como "cupones") del material en cuestión que posteriormente permite ser modelizado en estructuras complejas grandes.
- 10      Según la invención, un elemento que comprende todo el grosor del material se podría modelizar conjuntamente o, en caso de que el material comprenda capas, cada capa o subgrupo de capas puede modelizarse por separado.
- 15      Según la invención, se toma la determinación de elementos o capas de análisis en cuanto a si van a ser tratados o no como que experimentan aplastamiento. En unas realizaciones preferidas por simplicidad la determinación se toma decidiendo si la barrera de objeto impactante ha invadido físicamente el espacio asignado a un elemento dado o viceversa. En cuanto al modelo esto equivale a decidir si alguno de los nodos del elemento han "pasado a través" de la barrera o en otras realizaciones una parte frontal de aplastamiento definida en otra región del espacio del modelo. Si todavía no ha tenido lugar el fallo del elemento a través de un modo convencional de fallo, y la estructura de soporte no se ha derrumbado, entonces puede deducirse que el elemento experimentará aplastamiento. En unas realizaciones alternativas se hace un cálculo explícito del esfuerzo o deformación en el elemento que se compara con un valor umbral de fallo. El elemento, por lo tanto, se designa como que se está aplastando si se supera este valor umbral. Sin embargo, la determinación se hace si se determina que un elemento está experimentando aplastamiento, se aplica el tratamiento acorde con la invención.
- 20      Se apreciará que la capacidad según la invención para modelizar el comportamiento de materiales que se están aplastando, como se ha intentado anteriormente, no requieren una reducción drástica del tamaño de los elementos finitos utilizados en el modelo, lo que en cualquier caso llevaría a un tiempo o requisitos de potencia informática desmesuradamente grandes. En cambio una ventaja práctica de utilizar un modelo esencialmente continuo de la fuerza de aplastamiento, como pueden verse los métodos de la presente invención, es permitir tamaños de elemento que son del mismo orden de tamaño que los que se emplearían para un análisis equivalente de una estructura metálica. Esto se debe a que cuando un elemento se ha sido forzado a un régimen de aplastamiento, según se determine de acuerdo con la invención, y siempre y cuando la estructura que soporta el elemento en cuestión sea capaz de resistir las fuerzas que intervienen, su longitud de orilla ya no se comprime contra la pared del objeto impactante u otra parte frontal de aplastamiento pero se permite efectivamente pasar a través, sometido, por supuesto, a la fuerza de resistencia en la pared que dictamina la longitud de orilla, grosor y esfuerzo de resistencia al aplastamiento, etc. proyectados.
- 25      Aunque en muchos casos en los que se aplican los principios de la invención el objeto impactante será un objeto sólido y rígido que golpea a la estructura, esto no es esencial y el objeto impactante podría comprender otra parte o cuerpo de la estructura con suficiente resistencia y rigidez.
- 30      En unas realizaciones preferidas en la actualidad se emplean elementos de cáscara aunque como alternativa se podrían utilizar elementos sólidos o de viga.
- 35      En algunas realizaciones se puede preferir, por ejemplo por razones de eficiencia computacional, que la velocidad relativa de la pared del objeto impactante o parte frontal de aplastamiento y el elemento en cuestión se considere constante durante el consumo del elemento. Sin embargo, esto no es esencial y preferiblemente la velocidad relativa se ajusta durante el paso de la parte frontal de aplastamiento a través del elemento. Preferiblemente la fuerza de resistencia se modifica a lo largo de la longitud del elemento de acuerdo con una función predeterminada de la velocidad relativa.
- 40      Las mismas consideraciones se aplican a la dependencia de ángulo para permitir la rotación durante el consumo del elemento. De hecho, en general podrá actualizarse cualquier parámetro del que depende la resistencia al aplastamiento durante el consumo del elemento, otro ejemplo es el grosor, la vibración, la temperatura, etc.
- 45      En algunas realizaciones preferidas puede especificarse el rozamiento de la interfaz de aplastamiento con la barrera u otra parte frontal de aplastamiento. Esto es ventajoso, ya que puede influir en si un elemento dado es lo suficientemente estable como para experimentar aplastamiento o si falla por otro mecanismo.
- 50      El modelizado de los efectos de un impacto de una estructura que incluyen materiales que se pueden aplastar, de acuerdo con la invención, puede llevarse a cabo sin tener en cuenta la amortiguación. En algunas realizaciones preferidas, sin embargo, se especifican coeficientes de amortiguación que podrían ser internos, externos o especificados globalmente por el modelo general de análisis por elementos finitos.
- 55      El material que se puede aplastar comprende un material compuesto, preferiblemente un material compuesto reforzados con fibra y más preferiblemente una resina reforzada con fibra de carbono.
- 55      Aunque los principios de la invención se pueden aplicar ampliamente, por ejemplo como parte de un modelo de análisis original, preferiblemente software, la implementación de la invención se incorpora en un paquete de

modelizado por elementos finitos. El tipo de modelizado por elementos finitos es preferiblemente no lineal y puede ser matemática analítica implícita, explícita o de otro tipo, aunque se prefiere análisis no lineal explícito. En la realización preferida actualmente, por ejemplo, el software se incorpora en el software de análisis por elementos finitos no lineal explícito MSC. Dytran (marca comercial).

**5 Breve descripción de los dibujos**

Ahora se describirá una realización preferida de la presente invención, solo a modo de ejemplo, haciendo referencia a los dibujos acompañantes, en los que:

La Fig. 1 es un diagrama de flujo esquemático que muestra el funcionamiento del software que plasma la presente invención;

10 La Fig. 2 es un gráfico que muestra la fuerza de resistencia frente a la deflexión para una muestra a prueba de un material compuesto;

La Fig. 3 es un gráfico de desaceleración frente al tiempo para un cono de prueba que experimentó un impacto en condiciones controladas;

La Fig.4 muestra la velocidad del trineo frente al desplazamiento para el experimento de la Fig-3;

15 La Fig. 5 muestra el perfil de desaceleración prevista; y

La Fig.6 muestra la velocidad prevista del trineo.

**Descripción detallada de realizaciones preferidas**

20 En una realización preferida de la invención, un software que funciona de acuerdo con los principios de la invención se incorpora en el paquete de análisis por elementos finitos MSC. Dytran (marca comercial) 2004 que está disponible de MSC.Software Inc. Este conocido software se puede programar con valores de tensión de fallo para materiales compuestos y de este modo para un elemento finito dado del material puede tratar de modelizar las fuerzas de ese elemento hasta que el esfuerzo que experimenta supera la tensión de fallo con lo que el elemento se suprime. Sin embargo, en la realización de la invención que se describe ahora, se complementa esta parte de la funcionalidad del software. En cambio, se sigue el proceso mostrado en la Fig. 1.

25 En este proceso, se determina en primer lugar, en 2, cuándo hay impacto entre el objeto impactante definido y un elemento seleccionado como que es capaz de aplastamiento de la estructura. Si hay contacto, se determina, en 4, si alguno de los nodos del elemento ha penetrado en el objeto impactante. Si ninguno de los nodos ha penetrado en el objeto impactante, el software pasa a la siguiente etapa principal en 6, en la que se actualiza el esfuerzo del elemento. Sin embargo, si se detecta penetración, el software pasa, en 7, a evaluar si el elemento conectado al nodo ya está etiquetado como que está experimentando aplastamiento. Si no es así, el software añade esta etiqueta al nodo en 8 y luego pasa a actualizar el esfuerzo del elemento en 6. Si en cambio el elemento conectado al nodo ya había sido etiquetado como que está experimentando aplastamiento, en 9 se lleva a cabo una serie adicional de subrutinas. En primer lugar, la fuerza de contacto se establece en cero. En segundo lugar, se almacena la dirección de aplastamiento y por último se almacena la velocidad relativa.

35 La siguiente etapa principal en 6 es actualizar el esfuerzo sobre el elemento. Para ello se determina, en 10, cuántos nodos del elemento han sido etiquetados como que experimentan aplastamiento. Si se han etiquetado todos los nodos del elemento, se considera que el elemento ha fallado y, por lo tanto, se retira de cálculos adicionales en 12. Si está etiquetado uno o más, pero no todos los nodos, el software, en 14, proyecta la dirección de aplastamiento en el sistema de coordenadas del elemento para permitir la determinación de la dirección correcta para que sean calculadas las propiedades de los materiales. A continuación, determina el esfuerzo de resistencia del elemento a partir de unos datos aportados (se explica con mayor detalle a continuación haciendo referencia a la Fig. 2) y todo el elemento se etiqueta como que está experimentando aplastamiento.

40 Como alternativa, si en la etapa de evaluación 10 ninguno de los nodos está etiquetado como que experimenta aplastamiento, el sistema simplemente no hace nada, en 16. Cualquiera que sea la posibilidad encontrada 12, 14, 16, el software pasa a 23, donde se lleva a cabo la actualización convencional del esfuerzo de elemento finito antes de pasar a la tercera etapa principal del proceso, en la que se calcula contacto de aplastamiento, en 18.

En esta fase, se toma una determinación, en 20, de si el elemento ha sido etiquetado como que experimenta aplastamiento. Si el elemento no se ha etiquetado, el proceso continúa con el análisis convencional anterior antes de regresar al inicio del proceso mostrado en la Fig. 1.

50 Sin embargo, si el elemento ha sido etiquetado, se realizan cuatro acciones. En primer lugar, se calcula el punto de intersección entre el elemento y el objeto impactante.

Se calcula la intersección para determinar la cantidad de material que se está aplastando. Si un triángulo se aplasta desde un vértice, aumentará el material que se está aplastando y, como resultado, la fuerza de resistencia aumentará a medida que se consume el elemento a través de la barrera. En segundo lugar, se obtiene la dirección de aplastamiento, en tercer lugar se obtiene el esfuerzo de aplastamiento y finalmente se calculan las fuerzas de aplastamiento. A partir de ese momento, el proceso continúa con el análisis convencional anterior antes de regresar al inicio del proceso mostrado en la Fig. 1.

Con el fin de calcular la resistencia predeterminada que se debe introducir en el modelo descrito anteriormente, una pequeña muestra del material compuesto se somete a una prueba de aplastamiento. En un ejemplo, se cortan unas secciones de material de 60 x 30 mm de placas planas y se adhieren a un sándwich de panel de 50 mm de grosor con el fin de promover un aplastamiento estabilizado. Las orillas exteriores de cada piel presentada para el objeto impactante están achaflanadas con aproximadamente 60° para presentar una orilla afilada para minimizar el pico de resistencia al aplastamiento exhibido en el inicio del aplastamiento y minimizar de ese modo el riesgo de deslaminación desde el panel en el inicio del aplastamiento en el que el fallo inicial corresponde a las prestaciones del elemento por fallo de compresión. Las celdas del panel están orientadas perpendicularmente a la dirección de aplastamiento de la muestra y por lo tanto no absorben una cantidad significativa de energía pero aseguran que las pieles no pandean. En la Fig. 2 se muestra una representación típica de fuerza de resistencia exhibida por una muestra frente a la deflexión (es decir, la cantidad de la muestra que se ha aplastado). A partir de esto se verá que por la mayor parte del intervalo de deflexión la fuerza es relativamente constante. Al tomar un valor promedio adecuado para esto, se puede determinar la fuerza de resistencia a utilizar en el modelo de análisis para un material particular. Dado que la muestra tiene un área constante en sección transversal, no hay variación de la fuerza de resistencia con el área de contacto. Sin embargo, en el modelo el valor real de la fuerza de resistencia se calcula como directamente proporcional a la longitud de contacto.

Se apreciará que este método de prueba de muestras proporciona una forma barata de determinar las propiedades estabilizadas de aplastamiento para una gran variedad de configuraciones de distribuciones y ángulos. De este modo, típicamente, estas pruebas se realizarían para cada una de las construcciones de materiales utilizadas en la estructura que se va a modelizar como capaz de aplastarse y, opcionalmente, cada uno en un intervalo de ángulos.

En un ejemplo de aplicación de la realización descrita, una estructura cónica de sección rectangular de un material de compuesto fibra de carbono T300 de aproximadamente 85 x 115 mm de sección y aproximadamente 455 mm de largo se montó en una barrera rígida y un trineo rígido se propulsó a una velocidad controlada adentro del cono. La Fig. 3 muestra la deceleración medida del trineo frente al desplazamiento filtrado utilizando un filtro de paso bajo Butterworth Order4 con frecuencia de corte superior de 300 Hz en este experimento (el impacto se produce en el desplazamiento = 0). A partir de esto se puede calcular la fuerza de resistencia real simplemente a partir de la desaceleración del carro y su masa. La Fig.4 muestra la velocidad del trineo frente al desplazamiento para el mismo experimento.

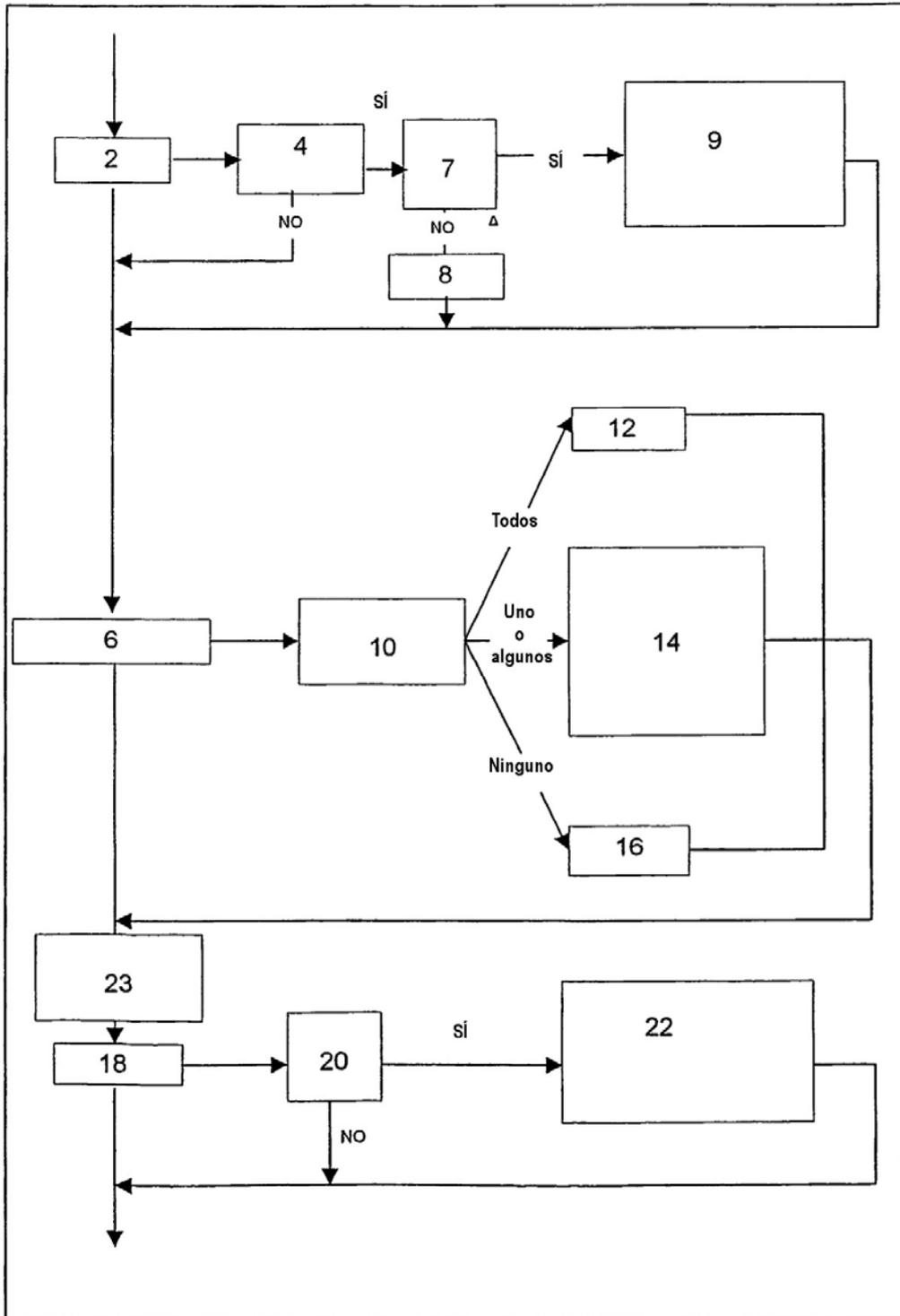
El cono se modelizó utilizando el software Dytran 2004 modificado tal como se describe anteriormente con referencia a la Fig. 1. El perfil de desaceleración prevista se muestra en la Fig. 5. filtrado de la misma manera que los resultados de la prueba, utilizando un filtro de paso bajo Butterworth Order4 con frecuencia de corte superior de 300 Hz. A partir de esto se ve que los perfiles y los valores absolutos de la desaceleración son similares. La Fig. 6 muestra la velocidad prevista del trineo y aquí existe una notoria similitud entre los resultados de la prueba y los previstos. Por ejemplo, la distancia que cuesta llevar el carro a un descanso se previó como 327 mm y se midió como 328 mm, lo que significa que la predicción tuvo una precisión del 1%. Esto es mucho más preciso que lo que se podría obtener con métodos de la técnica anterior.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método implementado en ordenador para determinar la resistencia a impactos de una estructura que incluye un material compuesto que se puede aplastar, que comprende:
- 5 llevar a cabo cálculos de análisis por elementos finitos para determinar dicha resistencia a impactos, el método comprende además las etapas de:
- determinar una o más capas de un elemento finito de dicho material durante un impacto si dicho elemento o capa del mismo se va a tratar como que falla por aplastamiento; y
- si se determina que dicho elemento o capa va a fallar, el método comprende además las etapas de:
- suspender los cálculos del análisis por elementos finitos para dicho elemento o capa,
- 10 calcular la resistencia en curso para el elemento o capa, en donde dicha resistencia en curso es inferior al máximo esfuerzo de fallo por compresión del elemento o la capa, y en donde dicha resistencia en curso se calcula a partir de la teoría de materiales o se determina empíricamente, de tal manera que para un conjunto dado de condiciones macroscópicas que comprenden el área de contacto con un objeto impactante, la velocidad y un ángulo de impacto, la resistencia es un único valor macroscópico,
- 15 definir una parte de apoyo de carga de la estructura, y
- tratar dicha parte de apoyo de carga con el propósito cálculos subsiguientes como que exhiben dicha resistencia en curso en toda la longitud consumida del elemento o capa.
2. Un método según la reivindicación 1 en donde dicha parte de apoyo de carga comprende una parte de dicho elemento o capa.
- 20 3. Un método según la reivindicación 2 que comprende definir una parte frontal de aplastamiento y permitir que dicho elemento o capa pasen a través de dicha parte frontal de aplastamiento mientras se está aplastando.
4. Un método según la reivindicación 2 o 3 que comprende aplicar dicha resistencia en curso a nodos individuales del elemento o capa de modo que la parte de apoyo de carga comprende dichos nodos.
5. Un método según la reivindicación 4 que comprende:
- 25 definir una parte frontal de aplastamiento y permitir que dicho elemento o capa pasen a través de dicha parte frontal de aplastamiento mientras se está aplastando; y
- dividir dicha resistencia en curso entre los nodos que han pasado a través de la parte frontal de aplastamiento y los nodos que no, como una función de la cantidad del elemento o capa por área o distancia de penetración que ha pasado a través de la parte frontal de aplastamiento.
- 30 6. Un método según la reivindicación 5 que comprende dividir dicha resistencia en curso entre los nodos que han pasado a través de la parte frontal de aplastamiento y los nodos que no, en proporciones según la cantidad del elemento o capa por área o distancia de penetración que ha pasado a través de la parte frontal de aplastamiento.
7. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende determinar si el elemento o capa se va a tratar como que falla por aplastamiento mediante la determinación de si una barrera de objeto impactante ha invadido adentro de un espacio asignado a dicho elemento o capa.
- 35 8. Un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6 que comprende determinar si el elemento o capa se va a tratar como que falla por aplastamiento mediante el cálculo del esfuerzo o deformación sobre el elemento o capa y comparando dicho esfuerzo o deformación con un valor de fallo de umbral.
9. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende definir una parte frontal de aplastamiento y determinar dicha resistencia en curso como una función de un grosor del elemento o capa que están siendo aplastados a lo largo de la parte frontal de aplastamiento y/o como una función de una zona de contacto con la parte frontal de aplastamiento.
- 40 10. Un método según la reivindicación 9 en donde para un elemento dado dicha resistencia en curso tiene un valor real que es una función constante del área de contacto.
- 45 11. Un método según la reivindicación 10 que comprende definir dicha resistencia en curso como directamente proporcional al área de contacto.

12. Un método según cualquier reivindicación precedente, en donde dicho material que se puede aplastar es un material compuesto que tiene una pluralidad de capas, el método comprende determinar dicha resistencia en curso como una función de la distribución de dichas capas.
- 5 13. Un método según la reivindicación 12 que comprende determinar dicha resistencia en curso como una función del orden de dichas capas en el material compuesto y/o como una función de uno o más parámetros dinámicos relacionados con el impacto.
14. Un método según la reivindicación 13 que comprende determinar dicha resistencia en curso como una función de una velocidad y/o el ángulo con el que se golpea dicho elemento o capa, y/o como una función de la cantidad de rotación impartida al elemento o capa.
- 10 15. Un método según cualquier reivindicación precedente, que comprende la etapa de designar un conjunto de elementos finitos de la estructura como que es susceptible de aplastamiento.
16. Un método según la reivindicación 15 en donde dicho conjunto es sólo un subconjunto de todos los elementos disponibles.
- 15 17. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende además llevar a cabo cálculos en paralelo por elementos finitos y revertir a dichos cálculos en el caso de que en cualquier momento se calcule que el elemento o capa ha fallado debido a un modo de fallo sin aplastamiento.
18. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende asignar a un elemento una capacidad degradada de aplastamiento para un análisis futuro de aplastamiento si el análisis de dicho elemento o capa revierte al análisis de elementos finitos.
- 20 19. Un método según cualquier reivindicación precedente en donde dichos elementos finitos son elementos de cáscara, elementos sólidos o transmitir de viga.
20. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende definir una parte frontal de aplastamiento y ajustar la velocidad relativa entre un objeto impactante y dicho elemento o capa durante el paso de la parte frontal de aplastamiento a través del elemento.
- 25 21. Un método según la reivindicación 20 que comprende modificar la resistencia en curso a lo largo de la longitud del elemento según una determinada función de la velocidad relativa.
22. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende definir una parte frontal de aplastamiento y ajustar un ángulo de impacto entre un objeto impactante y dicho elemento o capa durante el paso de la parte frontal de aplastamiento a través del elemento.
- 30 23. Un método según la reivindicación 22 que comprende modificar la resistencia en curso a lo largo de la longitud del elemento según una determinada función del ángulo de impacto.
24. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende definir una parte frontal de aplastamiento y especificar un rozamiento del elemento o capa con la parte frontal de aplastamiento.
- 35 25. Un método según cualquier reivindicación precedente que comprende especificar coeficientes de amortiguación del material.
26. Un método según cualquier reivindicación precedente en donde dicho material que se puede aplastar comprende un material compuesto, preferiblemente un material compuesto reforzado con fibra, más preferiblemente una resina reforzada con fibra de carbono.
- 40 27. Un soporte legible por ordenador que comprende un software informático que cuando se ejecuta en un ordenador ejecuta un método según cualquier reivindicación precedente.
28. Un aparato de procesamiento de datos programado para ejecutar el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 26.

FIG 1



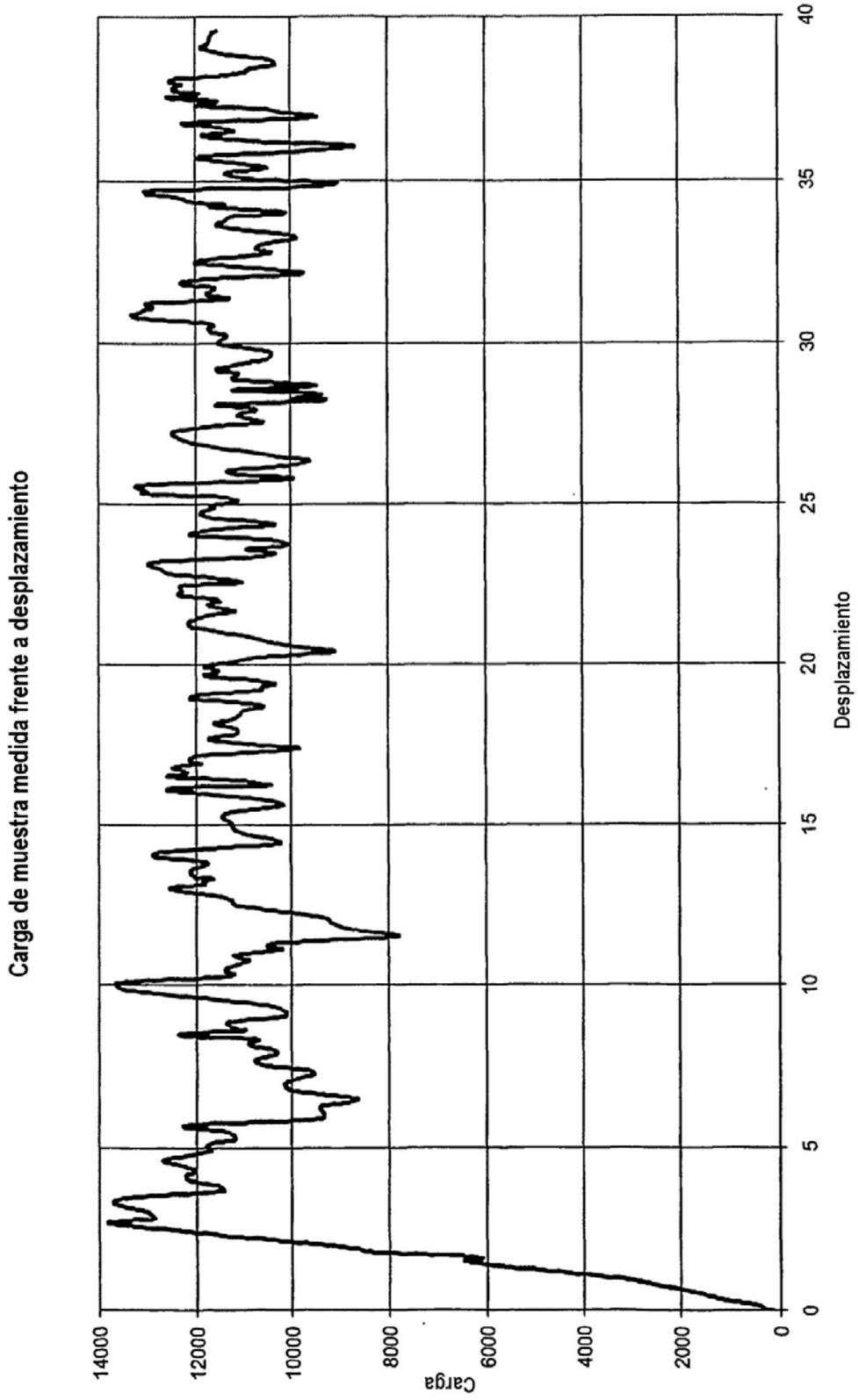


Fig. 2

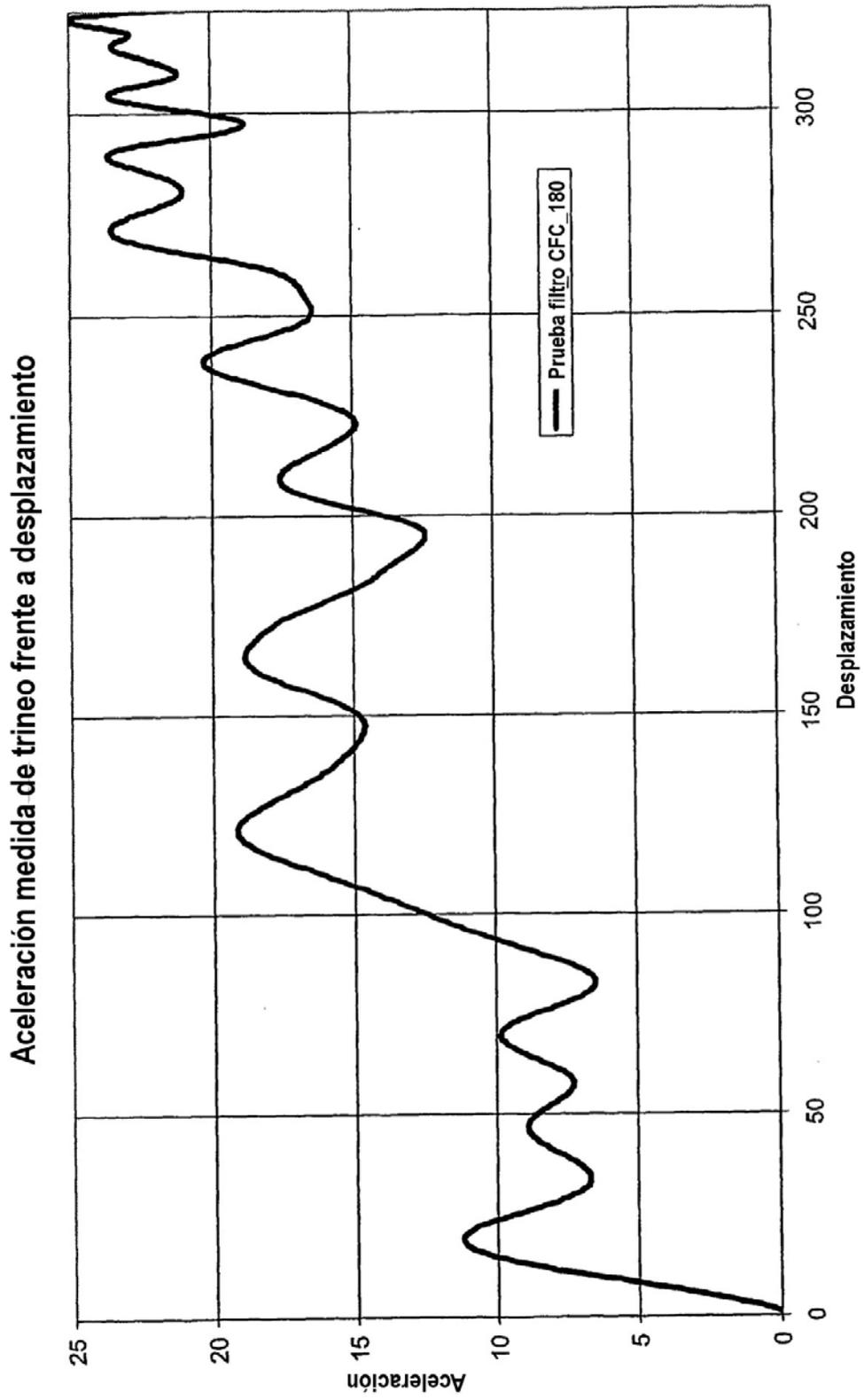


Fig. 3

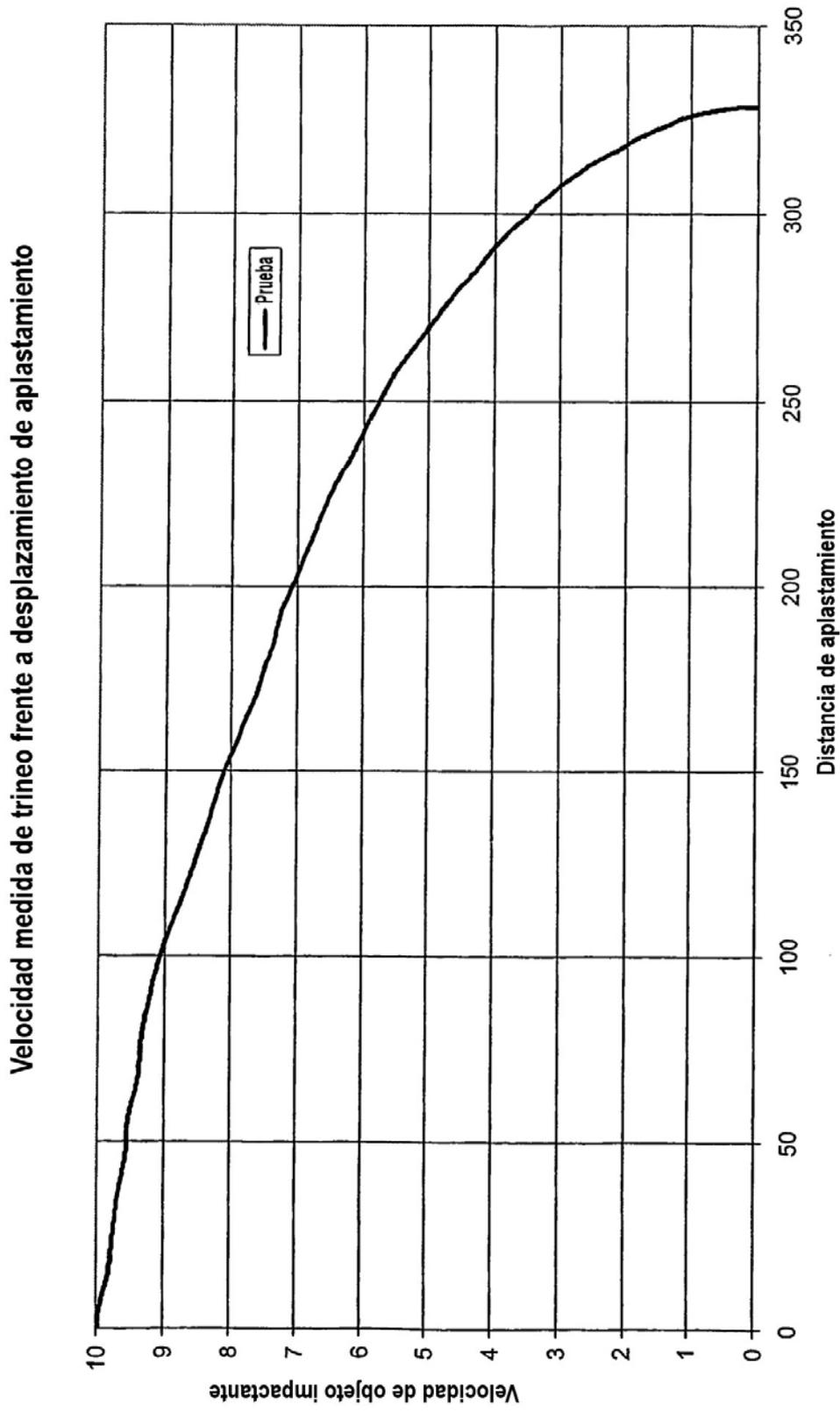
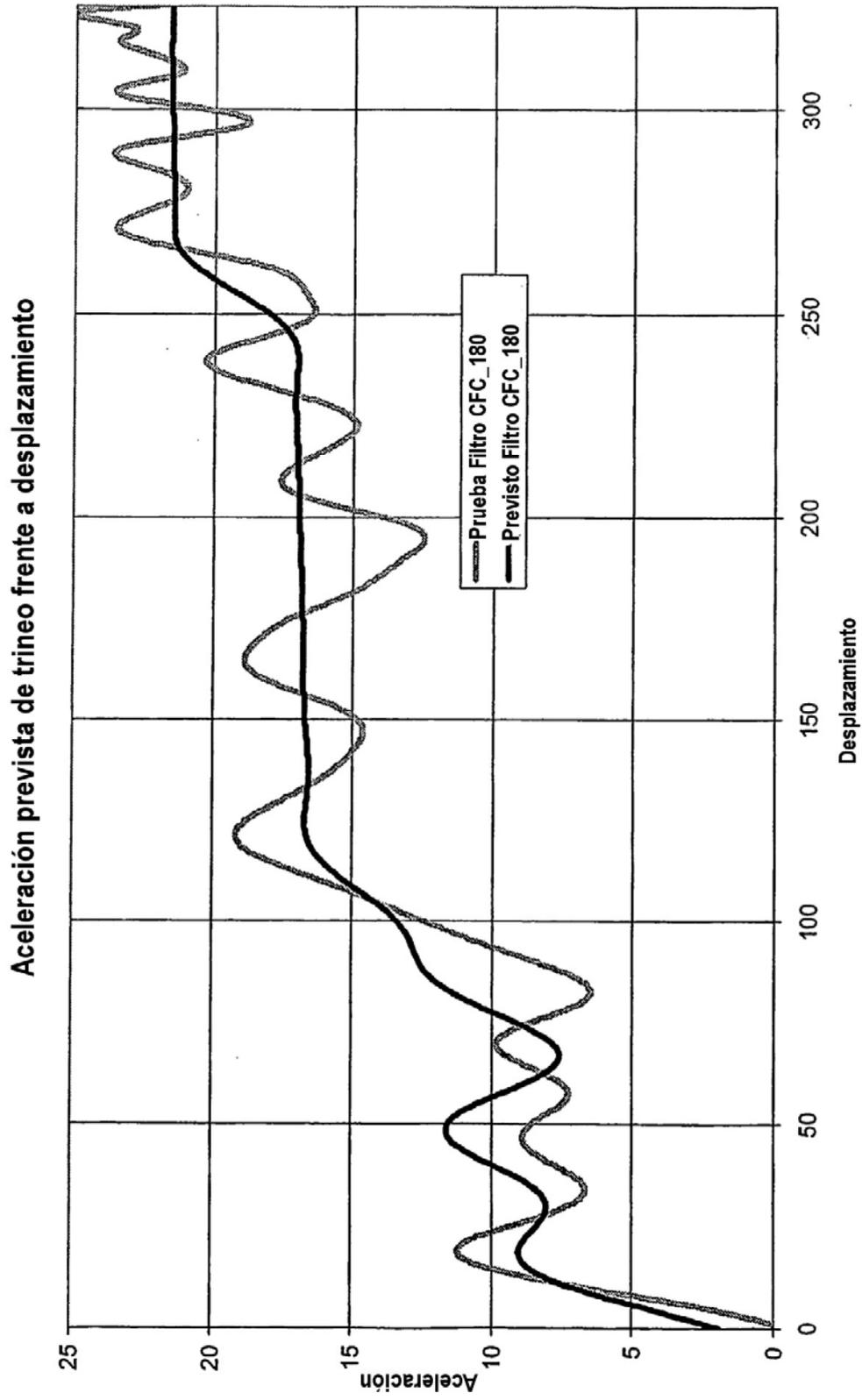


Fig. 4



**Fig. 5**

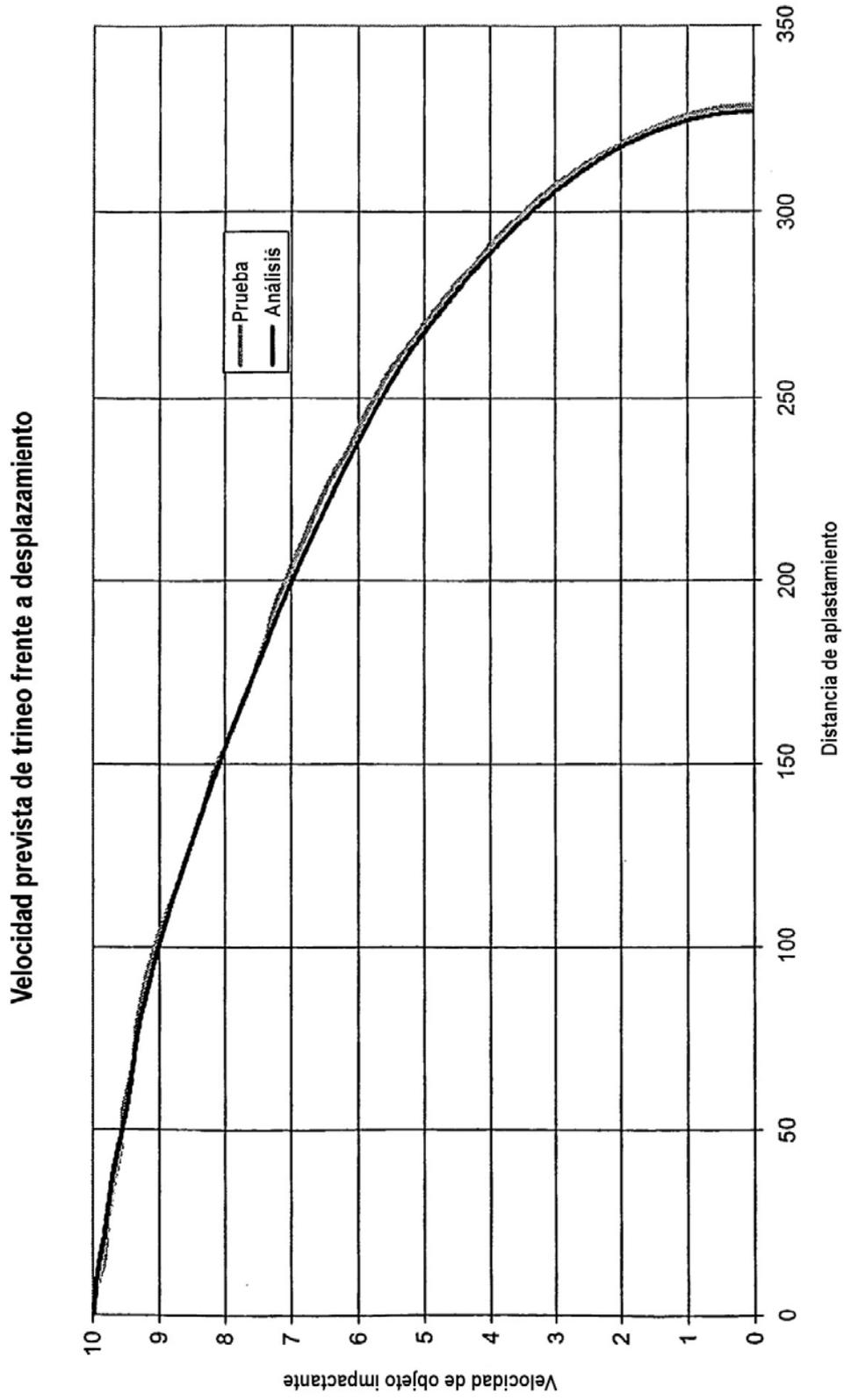


Fig. 6