

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 743 226**

51 Int. Cl.:

G01N 27/83

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.03.2011 PCT/AU2011/000270**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.09.2011 WO11109869**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.03.2011 E 11752751 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.05.2019 EP 2545368**

54 Título: **Método y aparato para la predicción magnética de la profundidad de grietas**

30 Prioridad:

10.03.2010 AU 2010900993

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

18.02.2020

73 Titular/es:

**JRB ENGINEERING PTY LTD (100.0%)
24 Drummond Street
West Perth WA 6005 , AU**

72 Inventor/es:

**BLAIR, IAN STEWART;
KLECHA, STEPHANIE y
LISSIMAN, LLOYD**

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 743 226 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

Método y aparato para la predicción magnética de la profundidad de grietas

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método y a un aparato para la predicción magnética de la profundidad de grietas de componentes tales como, pero sin limitarse a, vías ferroviarias, ruedas de ferrocarril y vigas de acero.

10 **Antecedentes de la invención**

Las estructuras y los componentes que se ven sometidos a carga dinámica pueden monitorizarse para determinar daño por fatiga. Este daño se evidencia a veces mediante grietas de rotura superficial. La monitorización para determinar el daño por fatiga es importante a menudo para mantener la seguridad para personas y equipos que se usan o hacen funcionar en o sobre una multitud de estructuras de ingeniería tales como puentes, edificios, aeronaves y sistemas de transporte ferroviario. En el entorno del transporte ferroviario por ejemplo, la fatiga de contacto por rodadura (FCR) es una causa importante de daño en vías ferroviarias y ruedas de ferrocarril. Existen varios tipos de daño de tipo FCR que incluyen el agrietamiento, desconchado y asentamientos. El agrietamiento se manifiesta normalmente mediante una banda continua de grietas finas que se inician en la esquina de cara interior de una cabeza del carril. El desconchado se caracteriza por pequeños trozos de la cabeza del carril que se rompen y separan de la superficie en la que han coalescido las grietas de tipo FCR. Los asentamientos son vacíos bajo la superficie que no son visibles en la superficie del carril pero que se vuelven visibles cuando la superficie del carril se ha pulido.

25 En el entorno ferroviario, la FCR es resultado de sobreesfuerzos repetidos del material de la superficie o bajo la superficie de una vía ferroviaria o rueda de ferrocarril como resultado de ciclos repetidos de contacto rueda-carril.

Es habitual en el mantenimiento de vías ferroviarias esmerilar o pulir periódicamente la superficie de rodadura de una vía ferroviaria para eliminar o al menos disminuir la profundidad de grietas y defectos en la superficie de la vía para prolongar de ese modo la vida útil de la vía ferroviaria y evitar un fallo catastrófico. Para evitar esmerilar y pulir toda la vía ferroviaria en una red ferroviaria se usan diversas técnicas de pruebas no destructivas para detectar la existencia de grietas. Los ejemplos de técnicas de pruebas no destructivas incluyen pruebas por ultrasonidos, pruebas magnéticas, sistemas de corrientes parásitas y sistema de monitorización de grietas por presión diferencial. Estas técnicas no se limitan a su uso en un entorno ferroviario y se usan para realizar pruebas de otros componentes o estructuras de soporte de carga compuestos por un material imantable. En muchas situaciones, la mera existencia de una grieta no es en sí misma una preocupación importante. Son otras características de la grieta las que desencadenan procedimientos de mantenimiento o correctores para un componente o una estructura que de soporte de carga. Una de estas características es la profundidad de la grieta. Por ejemplo, la existencia de múltiples grietas superficiales poco profundas puede no requerir ninguna acción mientras que una única grieta profunda puede requerir una acción inmediata.

El documento JHPI, vol. 44, n.º 1 (2006) páginas 47-54, describe una técnica de fuga de flujo magnético (FFM) para fisuras superficiales en componentes ferromagnéticos usando un procedimiento de imantación residual sin un campo de dispersión procedente de los equipos de imantación.

En el documento Y. Li *et al.* / NDT&E International 39 (2006) 367-373 se investigaron las corrientes parásitas generadas por el movimiento a alta velocidad de sistemas de inspección de fuga de flujo magnético usando simulaciones numéricas y se examinaron las señales de FFM a partir de la medición de FFM a alta velocidad frente a la profundidad del defecto.

En el documento IEEE Transactions on Magnetism, vol. 44, n.º 4, abril del 2008, se propone un procedimiento para la caracterización completa de grietas de rotura superficial rectangulares basándose en mediciones de sólo una componente tangencial del campo magnético con la técnica de fuga de flujo magnético.

55 **Sumario de la invención**

La invención se expone en las reivindicaciones adjuntas.

60 **Breve descripción de los dibujos**

La figura 1 es una representación esquemática de una sección de vía ferroviaria a la que puede aplicarse una realización del presente método;

la figura 1a es una representación de un modelo usado para derivar una relación entre el flujo remanente y la altura del sensor que se utiliza en realizaciones para realizar del presente método;

la figura 2 ilustra gráficamente una relación derivada empíricamente entre el índice de daño de una sección de carril, y la profundidad de una grieta en esa sección de carril;

la figura 3a es un alzado sobre su parte inferior de un patín de sensor usado en una realización del presente método;

la figura 3b ilustra las ubicaciones de sensores en el patín de sensor mostrado en la figura 3a con respecto a una sección de carril;

la figura 4 es una gráfica que ilustra la salida de un sensor incorporado en el patín mostrado en la figura 3;

la figura 5 es un diagrama de flujo que representa una realización de un método para predecir la profundidad de grietas;

la figura 6 es un diagrama de flujo que ilustra con mayor detalle una etapa de compensación de altura y filtrado incorporada en el método mostrado en la figura 5;

la figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra con mayor detalle una etapa de evaluación de daño grave incorporada en el método mostrado en la figura 5;

la figura 8 es un diagrama de flujo que representa con mayor detalle una etapa de predicción de la profundidad de daño incorporada en el método mostrado en la figura 5;

la figura 9a es una representación esquemática que ilustra la relación entre sensores en un patín conforme con respecto a la cabeza de carril para una realización del presente método;

la figura 9b representa una relación entre sensores en un patín plano de la parte superior mostrada en la figura 3 con una cabeza de carril;

la figura 10 es una representación de una señal de sensor de la parte superior mostrada en la figura 4 después de varias fases de procesado de la señal según realizaciones del método;

la figura 11 ilustra gráficamente una fase de integración en el procesamiento de datos según una realización del presente método; y,

la figura 12 ilustra un modelo de grieta o defecto usado en la realización del presente método.

Descripción detallada de la realización preferida

Se derivan realizaciones de la presente invención a partir de la observación y las pruebas extensas por el solicitante que indican una relación entre la profundidad de grieta y la fuga de flujo magnético desde una grieta en un material imantable. El término "material imantable" se usa en la totalidad de esta memoria descriptiva incluyendo las reivindicaciones para indicar materiales en los que puede inducirse magnetismo y un campo magnético remanente mantenido durante un periodo de tiempo después de la aplicación y posterior retirada de un campo magnético de inducción. La relación entre profundidad de grieta y fuga de flujo magnético se determina empíricamente para un componente de una geometría particular. Algunas realizaciones del presente método comprenden determinar la fuga de flujo magnético total para una sección de un componente y, utilizar la relación determinada empíricamente entre la fuga de flujo magnético y la profundidad de grieta para convertir la fuga de flujo magnético total en una profundidad de grieta predicha para esa sección del componente.

La relación empírica puede representarse mediante una ecuación matemática, una gráfica o una tabla de consulta. La fuga de flujo magnético total para una sección del componente se denomina "índice de daño". Cuando la relación empírica se representa gráficamente en un sistema de coordenadas 2D, el índice de daño, que es un número positivo, puede representarse a lo largo del eje Y, mientras que la profundidad de grieta puede representarse a lo largo del eje X.

Cuando se aplican realizaciones del método a una vía ferroviaria, se obtiene al menos una pero preferiblemente una pluralidad de señales representativas de la fuga de flujo magnético para franjas mutuamente adyacentes a lo largo de una sección de la vía ferroviaria. Estas señales se procesan entonces para determinar la fuga de flujo magnético total para esa sección de vía.

Las señales se obtienen imantando inicialmente la sección de carril, por ejemplo, haciendo pasar un imán permanente sobre la sección de carril para inducir un campo magnético remanente y posteriormente haciendo pasar uno o una pluralidad de sensores a lo largo de la vía en la que cada sensor produce una señal indicativa de la fuga de flujo magnético. Por tanto, la imantación y la detección se llevan a cabo en tiempos diferentes. El imán permanente y los sensores no están soportados sobre la misma estructura y discurren a lo largo de la sección de carril al mismo tiempo. Una pluralidad de sensores puede disponerse para detectar fuga de flujo magnético a lo largo

de franjas transversales adyacentes ya que discurren a lo largo de la sección de la vía para adquirir datos de una anchura predeterminada de la vía. Si existe sólo un sensor y, por tanto, una señal o una pluralidad de sensores y, por tanto, múltiples señales, la(s) señal(es) se procesa(n) para determinar la fuga de flujo magnético remanente total.

El procesamiento incluye filtrar la(s) señal(es) para esa sección de vía, calcular un diferencial de pico a pico máximo para la(s) señal(es), e integrar el diferencial máximo para la totalidad del/de los sensor(es) para esa sección de vía. El valor integrado es representativo de la fuga de flujo magnético remanente total o índice de daño de la sección de vía. Usando la relación determinada empíricamente entre la fuga de flujo magnético remanente y la profundidad de grieta predicha, y conociendo la fuga de flujo magnético remanente total (es decir, el índice de daño) puede "consultarse" la profundidad de grieta predicha para esa sección de vía.

La longitud de la sección de vía sobre la que se determina la fuga de flujo magnético remanente total puede variar según las características y el uso de la vía. Por ejemplo, en algunas circunstancias, la longitud de vía sobre la que se determina la fuga de flujo magnético remanente total puede ser del orden de 500 mm a 1000 mm. En otras circunstancias, esta longitud puede ser mayor, por ejemplo de más de 5 m, o menor, por ejemplo del orden de 250 mm.

La figura 1 ilustra una sección de una vía 10 ferroviaria en la que se han producido grietas 12 por fatiga de contacto por rodadura. Las grietas 12 han producido daño hasta una profundidad D desde una superficie 14 exterior de la vía 10. El lado derecho de la vía 10 es la cara 16 interior mientras que el lado izquierdo de la vía 10 es la cara 18 exterior. Las grietas 12 producidas por fatiga de contacto por rodadura se inician en la cara 16 interior y se propagan hacia la cara 18 exterior.

La realización de pruebas extensas por el solicitante ha revelado una estrecha relación entre la magnitud de firmas de flujo de daño por grietas y la profundidad de grieta real. Esta relación se halló mediante el examen de secciones de vía en servicio que contenían daño de tipo FCR. En resumen, las secciones de vía se retiraron de una línea en servicio y se imantaron haciendo pasar un imán permanente a lo largo de la sección de vía, dejando un flujo remanente en las secciones de vía después del paso del imán permanente. Se midió luego la fuga de flujo desde el flujo remanente. La superficie se pulió después una cantidad conocida y el procedimiento se repitió hasta que no había daño presente. El perfil del carril se tuvo en cuenta para este cálculo. Esta relación determinada empíricamente entre el índice de daño y la profundidad de grieta se muestra gráficamente en la figura 2 en la que se representa gráficamente el índice de daño frente a la profundidad de daño (es decir, grieta). El índice de daño está en las unidades de Gauss-mm. En realizaciones del presente método, el índice de daño se calcula usando mediciones de fuga de flujo remanente, luego se usa una gráfica del tipo mostrado en la figura 2 para proporcionar una predicción de la profundidad de grieta a lo largo de la longitud de la vía 10.

Algunas realizaciones de la presente invención se basan en el principio de fuga de flujo magnético remanente. Los materiales ferrosos no imantados contienen dominios magnéticos que se orientan aleatoriamente. Estos materiales pueden imantarse moviendo un imán a través de la superficie de artículos compuestos por tales materiales. Los dominios magnéticos en el material son atraídos hacia el imán que hace que se alineen con las líneas de flujo magnético del imán. Cuando se retira el imán, las líneas de flujo magnético permanecen en el artículo debido a los dominios alineados. Esto se conoce como flujo remanente. Si el artículo está libre de defectos, el flujo se desplaza sin perturbaciones a través del material. Sin embargo, los defectos soportan menos flujo que el material en volumen. Cuando las trayectorias de flujo se encuentran un defecto, no pueden desplazarse fácilmente a través del defecto. Esto produce la fuga del flujo en la ubicación del defecto. La cantidad de fuga de flujo está relacionada con el volumen del defecto encontrado.

En realizaciones de la presente invención, un imán, normalmente un imán permanente, se hace pasar a lo largo de la vía 10 ferroviaria para inducir un flujo remanente en el carril 10. Suponiendo que existen defectos en el carril, habrá una fuga de este flujo remanente que se detecta por uno o más sensores.

En un escenario ideal, el carril se satura magnéticamente por el paso del imán. Esto reduce la sensibilidad en el sistema de medición para la dirección de imantación, posición del imán y altura. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones prácticas, se requieren imanes de tierras raras muy grandes o electroimanes de alta potencia para saturar magnéticamente una sección de vía 10. En ausencia de saturación completa de una sección de vía 10, algunas realizaciones de la presente invención contemplan inducir un flujo magnético remanente en una sección del carril 10 mediante el uso de imanes permanentes relativamente pequeños que se hacen pasar en sólo un sentido en una sección de vía 10 para inducir un campo magnético remanente en la sección de vía 10.

Una vez que se ha inducido un campo magnético en la sección de vía, uno o más sensores se hacen pasar a lo largo de la vía con el fin de detectar fuga de flujo magnético remanente. Un tipo de sensor que puede usarse para esto es el sensor de efecto Hall. El sensor de efecto Hall funciona con el principio de la fuerza de Lorentz. A medida que se hace pasar una corriente eléctrica a través del sensor de efecto Hall en presencia de un campo magnético normal a la trayectoria de corriente se genera la fuerza de Lorentz. Esto hace que cambie la trayectoria eléctrica dando como resultado una separación de cargas a través de caras opuestas del sensor de efecto Hall. Esto produce

una tensión que es proporcional a la cantidad de flujo magnético.

La fuga de flujo magnético remanente se detecta a través de una porción de la superficie 14 exterior que constituye un área de interés A mostrada con sombreado en la figura 1. El área de interés A está delimitada longitudinalmente por una línea 22 imaginaria en la cara 16 interior de la vía 10, y una línea 24 imaginaria cerca de la cara 18 exterior de la vía 10. El área de interés A es la porción de la superficie 14 exterior que es más susceptible al daño de tipo FCR y donde tal daño es el más significativo en términos de la longevidad del carril 10, y la seguridad de un sistema ferroviario asociado.

Un sensor de efecto Hall puede proporcionar una señal fiable para una anchura sustancialmente menor que la anchura transversal del área de interés A. Por consiguiente, se usa una pluralidad de sensores con el fin de determinar la fuga de flujo remanente sobre el área de interés A. Se muestra una disposición de sensores 26 en las figuras 3a y 3b. La figura 3a ilustra un patín 28 que tiene una superficie 30 plana que soporta una pluralidad de (trece) sensores 26a - 26m (denominados a continuación en el presente documento en general "sensores 26"). Los sensores 26 se disponen en dos líneas transversales a través de la superficie 30 del patín 28 en un modo escalonado. El escalonamiento es meramente una función del tamaño y la forma físicos de los sensores 26. Esto permite que los sensores 26 detecten la fuga de flujo en franjas transversales mutuamente adyacentes de la superficie 14 exterior a medida que se atraviesa el patín 28 a lo largo de la longitud del carril 10. La figura 3b proporciona una representación de las ubicaciones relativas de los sensores 26 a través del área de interés A de la superficie 14 del carril 10.

En el presente ejemplo, como hay trece sensores 26, la detección de fuga de flujo magnético procedente del carril 10 se hace a lo largo de trece franjas mutuamente adyacentes Sa - Sm (denominadas a continuación en el presente documento en general "franjas S") mostradas en la figura 1. La anchura transversal de cada franja S es la misma, sin embargo debido a la curvatura particularmente en la cara 16 interior del carril 10, la longitud de arco entre franjas adyacentes es mayor que la distancia transversal entre las franjas.

El patín 28 se mantiene a una distancia constante de la superficie 14 exterior del carril 10 mediante un trole u otro equipo (no mostrado). La altura de un sensor 26 particular sobre la franja S correspondiente de la vía 10 tiene significación cuando se procesan las señales derivadas de los sensores 26. En particular, la cantidad de flujo medida desde la vía 10 depende de la altura H de los sensores 26 por encima de la vía 10. Esta relación puede modelarse mediante la siguiente ecuación matemática:

$$B = Br \frac{1}{\pi} \left[\text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2H\sqrt{A^2 + B^2 + 4H^2}} \right) - \text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2(H+C)\sqrt{A^2 + B^2 + 4(H+C)^2}} \right) \right]$$

(Ecuación 1)

donde B es el flujo medido en el sensor 26, Br es el flujo remanente en el carril 10, y A, B y C se relacionan con la geometría de la fuente de flujo remanente, en este ejemplo, los dominios magnéticos en la vía 10 que dan lugar a la fuga de flujo. Los dominios magnéticos se modelan como imanes M en barra respectivos de dimensiones A, B, C. La figura 1a muestra la relación entre las dimensiones A, B, C del imán M y la altura H hasta un sensor 26. Las pruebas realizadas por el solicitante han determinado que para una vía 10 de la configuración mostrada en la figura 1, A = 80, B = 4 y C = 2.

Cuando el patín 28 está conformado para adaptarse al perfil del carril 10 de modo que los sensores 26 se mantienen a una distancia constante y uniforme de la franja S subyacente de la superficie 14, entonces las señales derivadas de los sensores 26 son representativas del flujo magnético detectado a una distancia constante de la superficie 14 de manera transversal a través del carril 10. Sin embargo, si se usa un patín 28 plano tal como se muestra en la figura 3, resultará evidente que, por ejemplo, el sensor 26a está espaciado a una distancia mayor de la franja Sa subyacente que digamos el sensor 26k de la franja Sk. Por consiguiente, y tal como se explica con mayor detalle a continuación, en este caso, las señales procedentes de los sensores 26 requieren compensación de altura para tener en cuenta la reducción del flujo magnético con la distancia desde la superficie 14.

La figura 4 representa una señal típica procedente de un sensor 26 a lo largo de una longitud de 500 mm de la vía 10. En la presente realización, en la que se usan trece sensores 26, se producen trece señales simultáneamente a medida que se hace que el patín 28 atraviese a lo largo de una sección de la vía 10. Con el fin de proporcionar una predicción de la profundidad de grieta se procesan las señales procedentes de cada sensor 26.

La figura 5 ilustra ampliamente un método 40 de procesamiento de las señales procedentes de los sensores 26 para predecir la profundidad de grieta para una sección de la vía 10. El método 40 comprende una primera etapa 42 en la que se filtran las señales procedentes de los sensores 26 y se compensan para variaciones de altura entre los

sensores y la superficie 14 de la vía 10. Esto produce una señal P procesada de salida para cada señal de sensor de entrada. En este ejemplo, como hay trece señales de sensor, habrá trece señales Pa-Pn procesadas. En la etapa 44, se realiza una evaluación en cuanto a si las señales procesadas indican daño grave de la sección de vía 10. El daño grave se manifiesta normalmente en forma de un desconchado en el que se ha roto y separado un trozo de la cabeza de carril de una superficie 14. En el caso en que no se detecte un daño grave, el método 40 avanza a la etapa 46 en la que se realiza una predicción de la profundidad de grieta procesando adicionalmente las señales Pa - Pn procesadas. En el caso en que se detecte un daño grave, entonces el método 40 en la etapa 48 emite un informe de daño grave. Este informe identifica la ubicación de la sección de vía 10 que contiene el daño grave.

Las etapas 42, 44 y 46 se describen con mayor detalle con referencia a las figuras 6, 7 y 8. La figura 6 representa la etapa 42 de filtrado y compensación de altura de una señal procedente de cada uno de los sensores 26. La etapa 42 se lleva a cabo simultáneamente pero por separado para cada uno de los sensores 26. La etapa 42 comprende filtrado 50 de paso bajo, filtrado 52 de paso alto, compensación 54 de ruido eléctrico, corrección 56 de ganancia, corrección 58 de sensibilidad y compensación 60 de altura. También se ilustran las entradas 62, 64, 66, 68 y 70 respectivas para las etapas 50 y 54 - 60 en la figura 6.

La entrada 62 para la etapa 50 de filtrado de paso bajo es la tensión sin procesar de un sensor 26 específico. La tensión sin procesar de cada sensor 26 se muestrea usando el muestreo basado en distancia. Por ejemplo, la tensión del sensor puede muestrearse cada 0,25 mm. Esta tasa de muestreo de distancia es independiente de la velocidad de desplazamiento a lo largo de la vía. Si varía la velocidad de desplazamiento, entonces variará el número de muestras por segundo. Por ejemplo el muestreo cada 0,25 mm a 2 km/h produce 2.222 muestras por segundo mientras que cuando se desplaza a 40 km/h se producen 44.444 muestras por segundo. Aunque puede cambiarse la distancia a la que se toman las muestras para diferentes aplicaciones, para cualquier aplicación es fija particular e independiente de la velocidad de desplazamiento. En cambio, tal como se demostró mediante el ejemplo anterior, el muestreo en el dominio de tiempo (es decir, el número de muestras por segundo) depende de la velocidad de desplazamiento. Esto tiene significación en términos de ruido eléctrico que se basa en muestreo en el dominio de tiempo. El filtro de paso bajo es un filtro de hardware que está configurado para eliminar el ruido eléctrico de alta frecuencia. La frecuencia de corte depende de la frecuencia basada en el tiempo de las muestras. Por este motivo, la frecuencia de corte cambia con la velocidad. En la presente realización, la frecuencia de corte es del orden de la mitad de la frecuencia de muestreo de "tiempo".

Después de que una señal procedente de un sensor 26 se haya hecho pasar por un filtro de paso bajo en la etapa 50, entonces pasa a través de un filtro de software de paso alto en la etapa 52. Se ha determinado que el daño de tipo FCR produce normalmente firmas de flujo con una longitud de onda de <76 mm. Cualquier característica con longitud de onda mayor que esta se supone que son características de propiedad de "volumen" del carril 10. El propósito del filtrado de paso alto en la etapa 52 es eliminar la polarización de CC de las señales de tensión de sensor. En una realización, se usa un filtro de software de paso alto de cuarto orden de Butterworth en la etapa 52. El filtrado se realiza una vez en un sentido y luego en el sentido inverso. El filtrado en ambos sentidos compensa la distorsión de fase. En este respecto, cuando se aplica el filtro en sentido directo, la respuesta del filtro para cada punto de datos se basa en puntos de datos inmediatamente anteriores a ese punto de datos. Si el filtro se ejecuta en el sentido opuesto (hacia atrás) los puntos de datos se procesan en el sentido opuestos, lo que significa que los puntos de datos inmediatamente anteriores a los puntos de datos en cuestión son diferentes. Esto proporciona una salida de filtro diferente. Hacer pasar el filtro hacia delante y luego hacia atrás proporciona una respuesta simétrica. En términos prácticos, esto permite que las señales de los sensores 26 se adquieran haciendo pasar el patín 28 en cualquier sentido ya que se derivará una salida idéntica a partir de la fase 52 de filtrado independientemente del sentido.

Después de que la señal se haya procesado a través del filtro de paso alto en la etapa 52, se sustrae el ruido eléctrico de la señal en la etapa 54. La entrada 64 para la etapa 54 es el ruido eléctrico. Este ruido es esencialmente la lectura de un sensor 26 cuando está al "aire", es decir, fuera de la distancia de detección de cualquier flujo magnético.

Tras la etapa 54, la amplitud de la señal se somete a corrección o control de ganancia en la etapa 56. Esta etapa tiene en cuenta la ganancia real en el sistema. Por ejemplo, digamos que la ganancia del sistema es de diez (es decir, x10). Esta etapa convierte las amplitudes en las tensiones de sensor reales y corrige así la ganancia del sistema dividiendo, en este ejemplo, las amplitudes entre diez. Por consiguiente, la entrada 66 es, en efecto, un multiplicador de la amplitud de la señal. Un control de ganancia de una décima parte (es decir, x1/10) es apropiado para la presente realización.

Tras la etapa 56 de control de ganancia, la señal se somete a una etapa 58 de conversión de Gauss. La entrada 68 de sensibilidad para la etapa 58 es la sensibilidad de los sensores, por ejemplo, 0,04 v/gauss. Esta etapa convierte la tensión derivada de la etapa 56 en Gauss dividiendo esa tensión entre la sensibilidad (es decir, la entrada 68). Si se usan sensores 26 con diferente sensibilidad, entonces esa sensibilidad se usa como la entrada 68.

Tras la etapa 58, la señal experimenta una etapa 60 de acondicionamiento o compensación de altura para tener en cuenta la altura o distancia del sensor 26 desde la franja S inmediatamente subyacente de la superficie de la vía 14.

La etapa de acondicionamiento de altura comprende multiplicar la señal tras el procesamiento en la etapa 58 por el factor de:

$$= \frac{1}{\pi} \left[\text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2H\sqrt{A^2 + B^2 + 4H^2}} \right) - \text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2(H+C)\sqrt{A^2 + B^2 + 4(H+C)^2}} \right) \right]$$

donde, A = 80, B = 4, C = 2 y H = la distancia o altura perpendicular del sensor 26 desde la superficie 14 del carril. Las constantes A, B y C proporcionadas anteriormente están relacionadas con la aplicación del presente método a un carril 10. Para la aplicación de este método o bien a un carril de diferente configuración o bien alternativamente, a un componente de diferente forma o configuración tal como una rueda de carril o una viga de acero, entonces estas constantes serán diferentes. La etapa 60 de acondicionamiento de altura se aplica independientemente de si hay o no una variación en la distancia entre los sensores 26 y la superficie 14 subyacente. Cuando hay una variación en la distancia tal como cuando se usa un patín plano tal como se muestra en las figuras 3 y 9b, entonces esta etapa de acondicionamiento es una etapa de compensación de altura. Cuando no hay variación de distancia, tal como cuando se usa un patín conforme tal como se muestra en la figura 9b de modo que cada uno de los sensores 26 se espacia en la misma distancia desde una franja S subyacente de la superficie 14, la etapa 60 de acondicionamiento de altura simplemente multiplica cada señal por la misma constante.

La etapa 60 de acondicionamiento de altura es una etapa dinámica en la que se aplica a las señales procedentes de los sensores 26 en cada punto de muestreo. Esto se produce para tener en cuenta la variación del perfil de carril con la distancia. El perfil de carril varía de punto a punto a lo largo de una vía por muchos motivos incluyendo: fabricación no precisa, distorsiones debidas a la temperatura, desgaste no uniforme y diferentes procedimientos de mantenimiento en diferentes ubicaciones. Para facilitar la aplicación dinámica de la etapa de compensación de altura, en la etapa 70, se mide la altura real de los sensores 26 por encima de la superficie del carril en cada punto de muestreo. Tal medición puede llevarse a cabo usando diversas técnicas y tecnologías, que incluyen medición de distancia por ultrasonidos o láser. Sin embargo, se prevé que puede usarse para este propósito un sistema de medición óptica basado en láser desarrollado previamente por el solicitante y descrito en la patente estadounidense n.º 7492448. En cualquier caso y cualquiera que sea el sistema de medición de altura que se use, en la etapa 70 se mide la altura H para cada sensor 26 y se proporciona como entrada al cálculo de compensación que se produce en la etapa 60.

Dependiendo de la construcción del patín conforme, puede ser posible tomar una medición de altura sólo una vez, o sino fijar la altura H para todos los sensores 26 para cada punto de muestreo. En este respecto, puede construirse un patín conforme que soporte individualmente cada sensor sobre un rodillo en contacto con el carril en el que el rodillo se desvía para seguir el perfil longitudinal del carril. Por tanto, a medida que el patín se desplaza a lo largo del carril, cada sensor se mantiene físicamente a una altura H constante desde la superficie del carril. Aunque esto puede obviar la necesidad de aplicar de manera dinámica la etapa 70, en la práctica se cree que el uso del patín no conforme o plano permitirá que el patín se haga atravesar a lo largo del carril a una velocidad significativamente mayor que el patín conforme.

Las figuras 9b y 9a muestran la posición relativa de los sensores 26 con respecto a la superficie 14 de la vía 10 de un patín conforme (figura 9a) y un patín plano (figura 9b) del tipo mostrado en la figura 3. En un ejemplo, los centros de los sensores 26 están espaciados en 5 mm. En el caso en que los sensores sean más anchos que 5 mm, esto conduce a un escalonamiento de sensores 26 adyacentes que se muestran en la figura 3. Resulta evidente a partir de la figura 9b, que en el patín plano, la altura o distancia entre diversos sensores 26 y la superficie 14 del carril 10 difiere. En particular, la distancia entre los sensores 26a y 26b y la superficie 14 subyacente es diferente de la del resto de los sensores 26c-26m. Por tanto, cuando se usa el patín 28 plano para adquirir la fuga de flujo, la etapa 60 de acondicionamiento de altura compensa esta variación en la distancia de superficie de vía a sensor.

La salida de la etapa 60 que también constituye la salida de la etapa 42 comprende las señales Pa-Pn procesadas que forman conjuntamente la entrada 72 para la etapa 44. La figura 7 ilustra con mayor detalle la etapa 44 de evaluación de daño grave representada en la figura 5. El propósito de la etapa 44 es determinar si la vía 10 tiene una sección con daño grave tal como desconchado. El daño grave se caracteriza por una señal de baja frecuencia y alta amplitud. Los defectos más grandes tales como el desconchado generarán dipolos más intensos en el material del carril 10. Los dipolos más intensos generarán un flujo que existe a lo largo de mayores distancias desde la cara de la grieta. Esto significa que un daño importante presentará una respuesta de frecuencia menor que un daño de poca importancia. Las características de baja frecuencia y alta amplitud se usan en la etapa 44 para determinar la existencia de daño grave.

La figura 10 ilustra una señal P procesada usada como una de las entradas 72 para la etapa 44 de evaluación de daño grave. La representación gráfica de la señal P procesada mostrada en la figura 10 ilustra una pluralidad de

puntos de datos representados gráficamente como amplitud (eje Y) frente a distancia (X), siendo la distancia a lo largo de una sección de vía. En la determinación de si existe daño grave, se realizan recuentos individuales del número de puntos de datos para cada señal P por encima y por debajo de las amplitudes de umbral $\pm T$. Por tanto, con referencia a la figura 10, se realizan dos recuentos, el primero para puntos de datos por encima del nivel de umbral $+T$, y el segundo para puntos de datos por debajo del umbral $-T$. El recuento de puntos de datos se ilustra como la etapa 74 en la figura 7. Este recuento se realiza para cada una de las señales Pa-Pn. Para la presente realización, se determinaron empíricamente los umbrales como $+23,2$ y $-23,2$.

En la etapa 76, se determina el número total (es decir, la suma) de puntos para todos los sensores Pa-Pn por encima del umbral $+T$ ($\Sigma+T$) junto con el número total (suma) de puntos para todos los sensores Pa-Pn por debajo del umbral $-T$ ($\Sigma-T$). Estas sumas se determinan para cada uno de los sensores Pa-Pn dentro de una distancia predeterminada desde la superficie de la vía 10. Esta distancia en esta realización es de 6 mm. Si un sensor 26 está a una distancia mayor desde la superficie de la vía su señal se descarta.

En la etapa 78, se predetermina un indicador de daño grave. Para una sección del carril 10, el indicador de daño grave (SDI) es:

$$SDI = 35 \times \frac{\text{longitud de segmento (M)}}{\text{frecuencia de muestreo (MTM)}}$$

donde:

la longitud de muestreo es la longitud de la porción de vía en consideración, por ejemplo, un metro; y,

la frecuencia de muestreo es la frecuencia de muestreo de las señales de tensión procedentes de los sensores 26, por ejemplo, de 0,25 mm.

En la etapa 80, se realiza una comparación entre las sumas respectivas calculadas en la etapa 76 con el indicador de daño grave calculado en 78. Si:

$\Sigma+T > SDI$; o $\Sigma-T > SDI$

se genera un informe de daño grave en la etapa 48 que identifica la porción correspondiente de la vía. Esta identificación es relativamente sencilla y se calcula como una distancia desde un punto de partida conocido en la vía 10 en la que comenzó la detección del flujo magnético. Como se conoce el punto de partida, y la longitud de cada porción de vía que se somete al presente método (por ejemplo, teniendo cada porción un metro de longitud) y dado que las porciones de la vía son contiguas, puede realizarse un cálculo de la distancia desde el punto de partida conocido hasta la porción de vía que tiene el daño grave informado.

Si en la etapa 80, ni $\Sigma+T$ ni $\Sigma-T$ superan el SDI, entonces el método avanza hasta la etapa 46 de predicción de la profundidad de daño mostrada con detalle en la figura 8. La predicción de la profundidad de daño o agrietamiento se basa en un principio de que la cantidad de fuga de flujo remanente está relacionada con el volumen total del defecto o la grieta. Se supone que el flujo remanente detectado por todos los sensores 26 está relacionado con la geometría del artículo dañado (en este caso, el carril 10). El flujo se calcula para cada longitud de sección especificada (por ejemplo, un metro) de la vía 10. A lo largo de esta longitud, se analizan las señales procedentes de cada uno de los sensores 26. En la etapa 84, se determinan los picos más bajos y más altos a lo largo de la sección especificada para cada sensor 26. Después, se sustraen estos para proporcionar una diferencia de pico a pico para cada sensor para la sección en cuestión. Por ejemplo, con referencia a la figura 4, se muestra el pico más alto como 85 que tiene un valor de aproximadamente 3,6 mientras que el pico 87 más bajo es de -2,6. Por tanto, la diferencia entre el pico más alto y el más bajo para la señal a lo largo de la porción de la vía es de $3,6 - (-2,6) = 6,2$.

Como este procedimiento usa los valores de pico de los sensores, la fuga de flujo es representativa de la fuga de flujo total en vez de ser la fuga de flujo total real.

En la etapa 86, se sustrae el ruido del material de cada uno de los valores de pico a pico para cada uno de los sensores 26. El ruido del material se proporciona como entrada 88 y es el ruido para la vía 10 cuando no hay ningún defecto. El ruido es la señal captada por un sensor 26 cuando no hay ninguna grieta ni ningún defecto en la sección de vía 10. Esto se mide o determina empíricamente. Para esta realización, el ruido se determina empíricamente como de 1,1 Gauss. En la etapa 90, se integran las señales de pico a pico con ruido corregido para cada sensor 26. Esta etapa se ilustra gráficamente en la figura 11. La figura 11 representa el valor de pico a pico con ruido corregido para cada uno de los sensores 26a-26m. La integración en la etapa 90 es equivalente a calcular el área bajo la curva generada por una línea que une las salidas de pico a pico para cada uno de los sensores 26. La integración proporciona la fuga de flujo total para una sección de vía 10.

Puesto que la fuga de flujo total (es decir, la integración anterior) se calcula basándose en las señales más grandes medidas desde cada sensor, representa una predicción en el peor de los casos de la profundidad de daño.

En la realización del método 40, se analiza cada defecto o grieta como defecto "de tipo concha" teórico con una geometría WLD tal como se muestra en la figura 12. Se supone que este defecto teórico es representativo de una banda de material dañado en la sección de vía 10. La dimensión de D es la profundidad del defecto medida desde la superficie 14 del carril 10, la dimensión L es la longitud transversal del defecto y la dimensión W es la anchura del defecto (es decir, la anchura en la boca de una grieta) medida en un sentido de la longitud de la sección de vía 10.

Puesto que el flujo total está relacionado con la geometría del defecto:

$$\text{Flujo total del defecto} = Br = f(W, L, D)$$

W es la boca de la grieta, que se sabe que es al menos un orden de magnitud más pequeña que L o D ($W \sim 0,005$ mm, $D \sim 0,5$ mm). Como tal, se supone que es despreciable.

$$\Rightarrow Br = f(L, D)$$

También se establece que, para defectos de tipo FCR ferroviarios, están relacionadas la longitud de superficie del defecto (L) y la profundidad de penetración del defecto en el interior del carril o la rueda (D), por tanto, el flujo total puede aproximarse como

$$\Rightarrow Br = f(f(D), D) = f(D^2)$$

A partir de esto, se predice que el flujo total (Br) medido a partir de la muestra ferrosa (normalmente una vía ferroviaria o rueda de ferrocarril) estará relacionado con la profundidad de penetración del daño (D).

Por tanto la presente realización del método de la predicción de profundidad se basa en algunas suposiciones que son únicas para el daño de tipo FCR ferroviario. Cuando las realizaciones del método se usan para diferentes tipos de daño en otros componentes ferrosos estas suposiciones pueden requerir una revisión.

Estas suposiciones se resumen de nuevo tal como sigue.

1. Las bocas de las grietas tienen al menos un orden de magnitud por debajo de la longitud de la grieta.
2. El agrietamiento de tipo FCR existe como una banda de material dañado a lo largo de una sección de carril en la que todas las grietas crecen de manera similar.
3. La longitud de la superficie de la grieta de tipo FCR es proporcional a la profundidad de penetración.

En el caso de desconchado o vacíos superficiales, la suposición 1 ya no es válida. En esta situación, la presente realización del método identificará como que hay presente daño grave, pero no informará de una predicción de profundidad del daño. Esto se describió anteriormente con referencia a ambas figuras 5 y 7 en las que en el caso de daño grave, el método avanzó a la etapa 48 en vez de a la etapa 46 de predicción de daño.

Cuando una sección de vía 10 presenta daño de tipo FCR manifestado por una o más grietas, y la vía se imanta, las caras de grieta adyacentes siempre tendrán polaridad opuesta con el fin de mantener las trayectorias de flujo. Tal como se describió anteriormente, cada grieta actúa en efecto como fuente de flujo magnético. Las fuentes de polaridad opuesta adyacentes interferirán de manera destructiva. Cuando los defectos están espaciados ampliamente (por ejemplo, más de 8 mm), la interferencia destructiva es despreciable ya que la intensidad de señal desde la fuente disminuirá a una tasa de $1/R^2$ de modo que defectos adyacentes tienen poco efecto entre sí. Sin embargo, normalmente para FCR las grietas están espaciadas de manera más próxima, por ejemplo, normalmente 2-8 mm de modo que no se produce esta interferencia destructiva entre grietas o defectos. Debido a esta interacción, es posible que señales de defectos espaciados de manera muy próxima se fusionen en una forma de onda. Esto significa que defectos espaciados de manera muy próxima generarán señales de baja frecuencia que corresponden a muchos defectos. Por otro lado, los defectos espaciados ampliamente generarán señales individuales para cada defecto, lo que conduce a señales de mayor frecuencia. Los defectos más grandes generarán dipolos más intensos. Los dipolos más intensos generan un flujo que interfiere con el flujo a grandes distancias de la cara de grieta. Esto significa que se presentará un daño grave o importante en una respuesta de menor frecuencia que el daño de poca importancia, incluso si no hay interacción de señales. Las implicaciones de esto son que:

(a) El daño importante espaciado muy cercanamente (<4 mm) se representa mediante señales de baja frecuencia y alta amplitud.

(b) El daño de poca importancia espaciado muy cercanamente (<4 mm) se representa mediante señales de baja frecuencia y amplitud baja.

5 (c) El daño importante espaciado ampliamente (>8 mm) se representa mediante señales de baja frecuencia y amplitud muy alta.

(d) El daño de poca importancia espaciado ampliamente (>8 mm) se representa mediante señales de alta frecuencia y amplitud de moderada a alta.

10 A partir de esto, se concluye que la firma o fuga de flujo total para una sección de carril 10 (es decir, el índice de daño) estará dominado por la mayor señal en la misma. Esto corresponderá o bien al defecto más grande o bien al defecto más aislado. Como la existencia de un defecto grave se informa antes de la etapa 46 (y, de hecho, si existe daño grave entonces la etapa 46 no se lleva a cabo para esa porción de vía) el flujo total calculado en la etapa 90 se utiliza para proporcionar una predicción de profundidad de grieta/daño en la etapa 92. Esta etapa implica usar la
15 suma o el valor resultante de la integración en la etapa 90 como el índice de daño en la gráfica mostrada en la figura 2 y a partir de ese índice de daño leer una profundidad de grieta predicha. La profundidad de grieta predicha es la profundidad de grieta predicha para el defecto más aislado en la sección de vía. No es una profundidad de grieta predicha para cada grieta en la sección o la suma de las profundidades de grieta individuales para la sección. La sección de vía 10 con la que se relaciona la predicción de grietas puede identificarse fácilmente de la misma manera
20 que se indicó anteriormente para el daño grave. La profundidad de grieta predicha puede usarse entonces por el personal de mantenimiento para determinar si, y si así es qué, acción se requiere para la sección de vía correspondiente, por ejemplo, ninguna acción correctora, esmerilado o sustitución.

25 La realización anterior del presente método se describe en relación a la predicción de la profundidad de grietas en una vía ferroviaria. Sin embargo, resultará evidente para los expertos en la técnica; el método puede usarse igualmente para predecir la profundidad de grietas en otros artículos y materiales imantables tales como ruedas de ferrocarril, vigas estructurales, columnas, traviesas y similares.

REIVINDICACIONES

1. Método de predicción magnética de la profundidad de grietas para un componente imantable de una primera geometría, que comprende:

determinar una medición de fuga de flujo magnético remanente para una sección del componente obteniendo al menos una señal representativa de fuga de flujo magnético remanente en múltiples puntos de muestreo a lo largo de la sección del componente y procesar la al menos una señal para determinar la fuga de flujo magnético remanente; y,

convertir la fuga de flujo magnético remanente en una profundidad de grieta predicha para esa sección del componente usando una relación determinada empíricamente entre fuga de flujo magnético remanente y profundidad de grieta para un componente en servicio sometido a prueba previamente de la primera geometría;

caracterizado porque el componente imantable se ve sometido a fatiga de contacto por rodadura y el procesamiento comprende filtrar la al menos una señal a través de un filtro de paso alto digital en sentidos opuestos para eliminar componentes de señal que tienen una longitud de onda mayor que una primera longitud de onda.

2. Método según la reivindicación 1, que comprende aplicar un campo magnético en una dirección a lo largo de la sección del componente para producir el campo magnético remanente en la sección del componente y en el que la al menos una señal es representativa de la fuga de flujo magnético desde el campo magnético remanente.

3. Método según la reivindicación 2, en el que obtener la al menos una señal comprende obtener señales respectivas para cada una de una pluralidad de franjas mutuamente adyacentes de la sección del componente en cada punto de muestreo en el que las franjas se extienden de manera transversal a la dirección de aplicación del campo magnético.

4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que el filtrado comprende hacer pasar la al menos una señal a través de un filtro de paso bajo para eliminar señales de una longitud de onda menor que una segunda longitud de onda.

5. Método según la reivindicación 4, en el que la al menos una señal se hace pasar a través del filtro de paso bajo antes de hacerse pasar a través del filtro de paso alto.

6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que procesar la al menos una señal comprende acondicionar las señales basándose en la distancia entre el o cada sensor y una superficie subyacente del componente para cada uno de los puntos de muestreo.

7. Método según la reivindicación 6, en el que acondicionar la señal comprende multiplicar la o cada señal por un factor:

$$\frac{1}{\pi} \left[\text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2H\sqrt{A^2 + B^2 + 4H^2}} \right) - \text{ArcTan} \left(\frac{AB}{2(H+C)\sqrt{A^2 + B^2 + 4(H+C)^2}} \right) \right]$$

donde A, B y C son constantes que dependen de la geometría del componente y H es la distancia perpendicular del o de cada sensor desde la superficie subyacente del componente en cada punto de muestreo.

8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 3 a 7, en el que procesar comprende analizar la una o más señales y proporcionar una indicación de daño importante a la sección del componente

calculando sumas respectivas de puntos de datos a partir de las señales filtradas de paso alto por encima y por debajo de umbrales positivo y negativo respectivos para todos los sensores, comparando las sumas con un indicador de daño grave precalculado, e informando de la existencia de daño importante cuando cualquier suma supere el indicador de daño grave precalculado.

9. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, en el que procesar comprende además calcular una amplitud de pico a pico máxima para la o cada señal filtrada para la sección del componente.

10. Método según la reivindicación 9, en el que procesar comprende además integrar la amplitud de pico a pico para la o cada señal para la sección del componente para proporcionar la medición de fuga de flujo magnético remanente para la sección del componente.

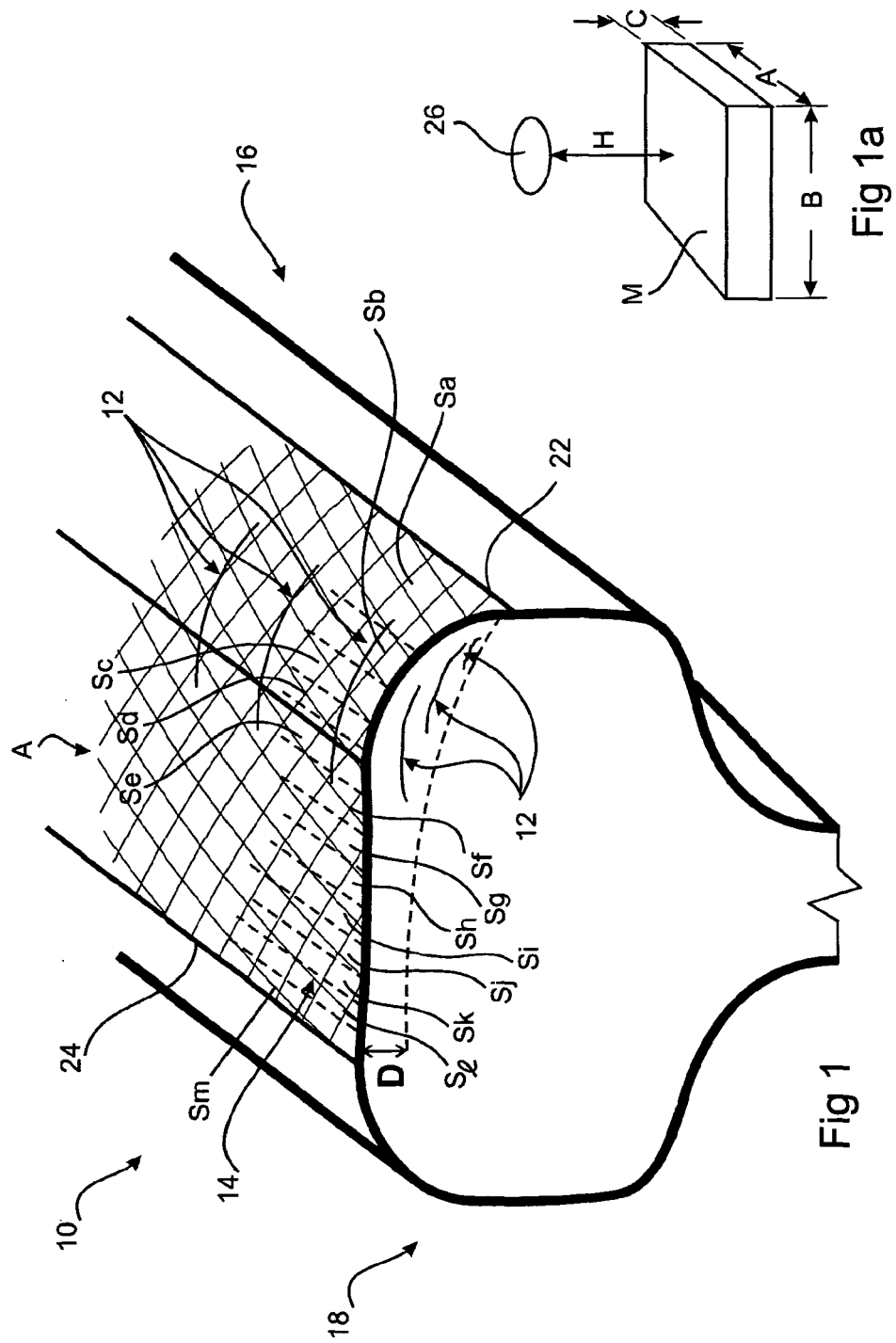


Fig 1

Fig 1a

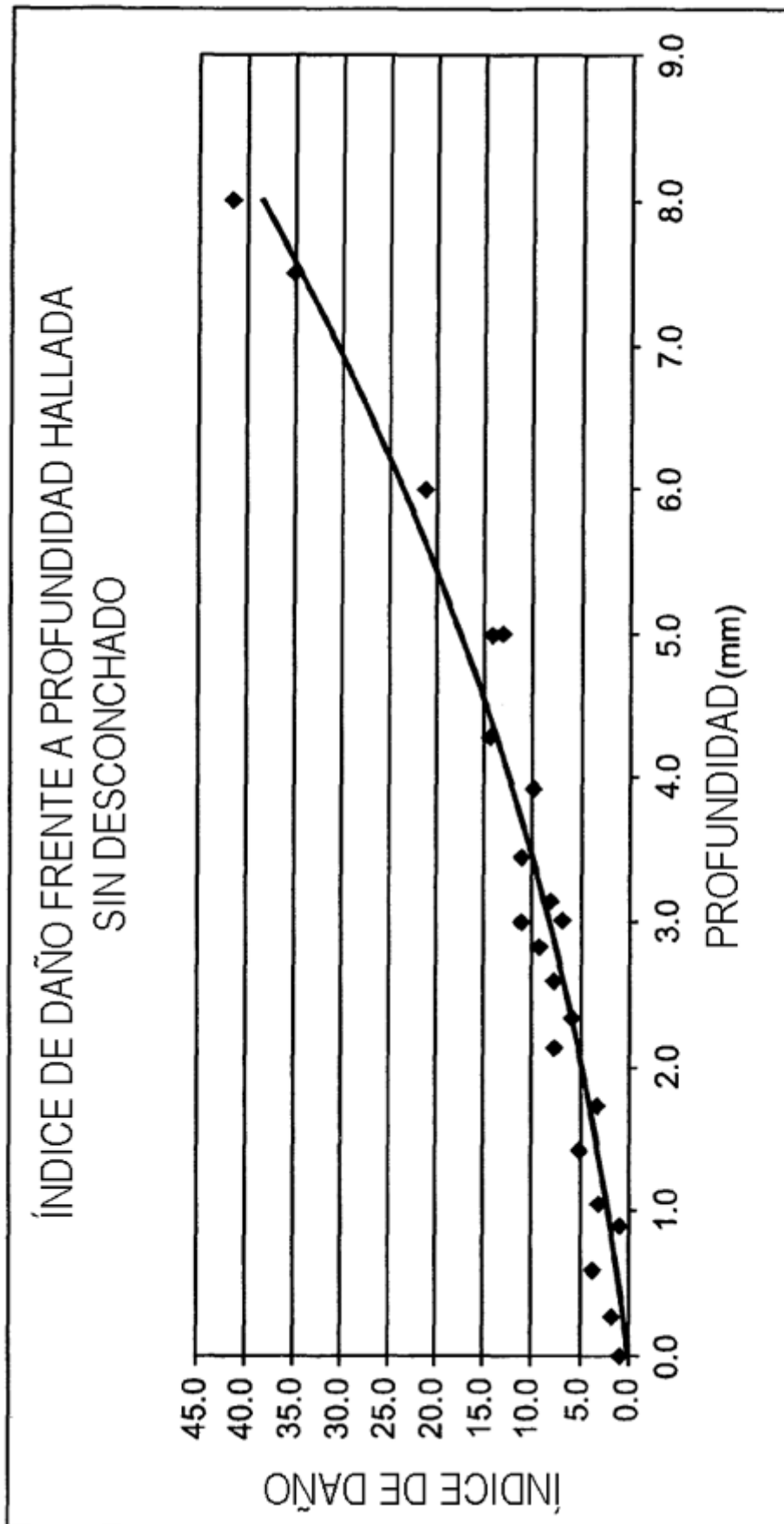


Fig 2

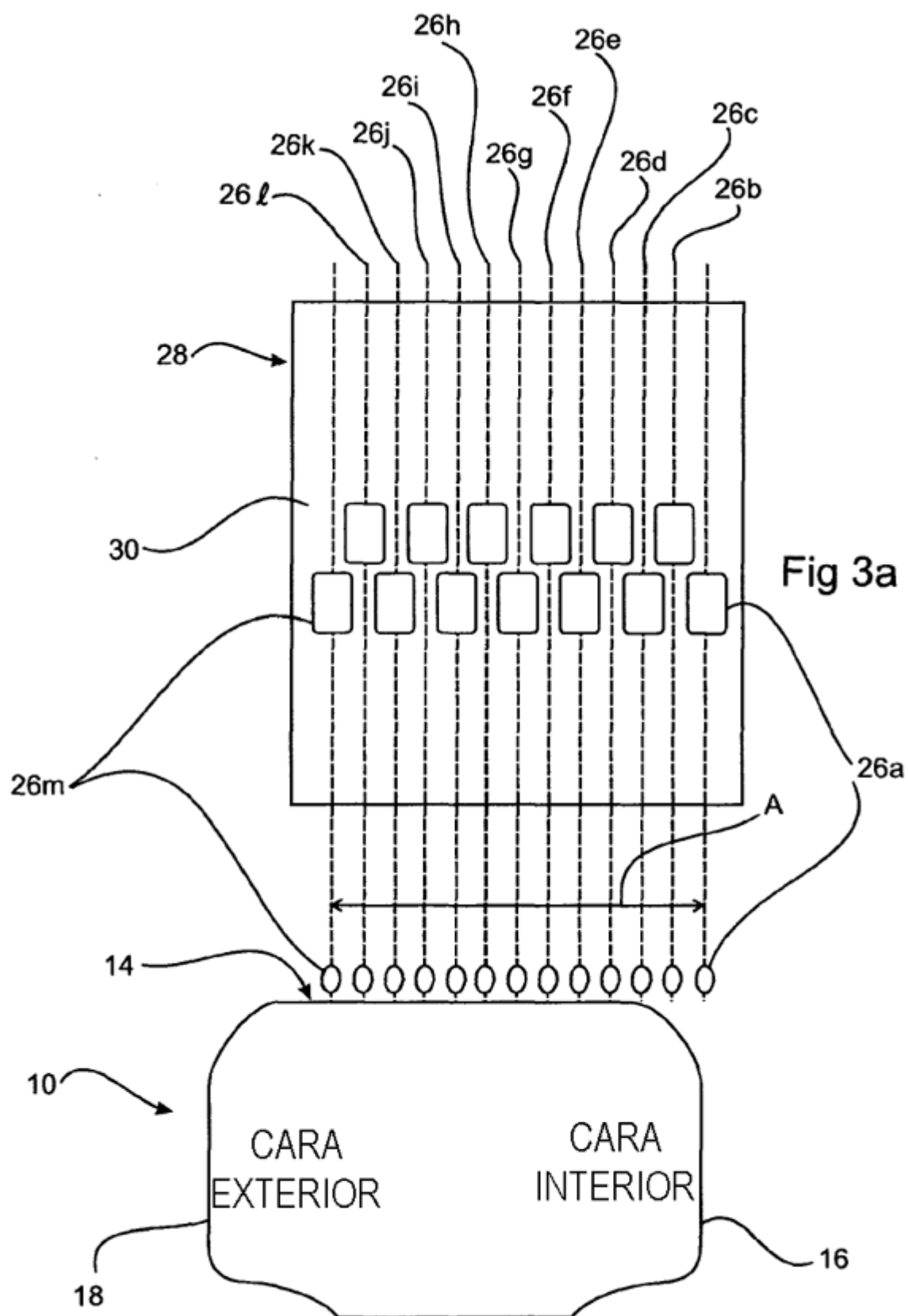


Fig 3b

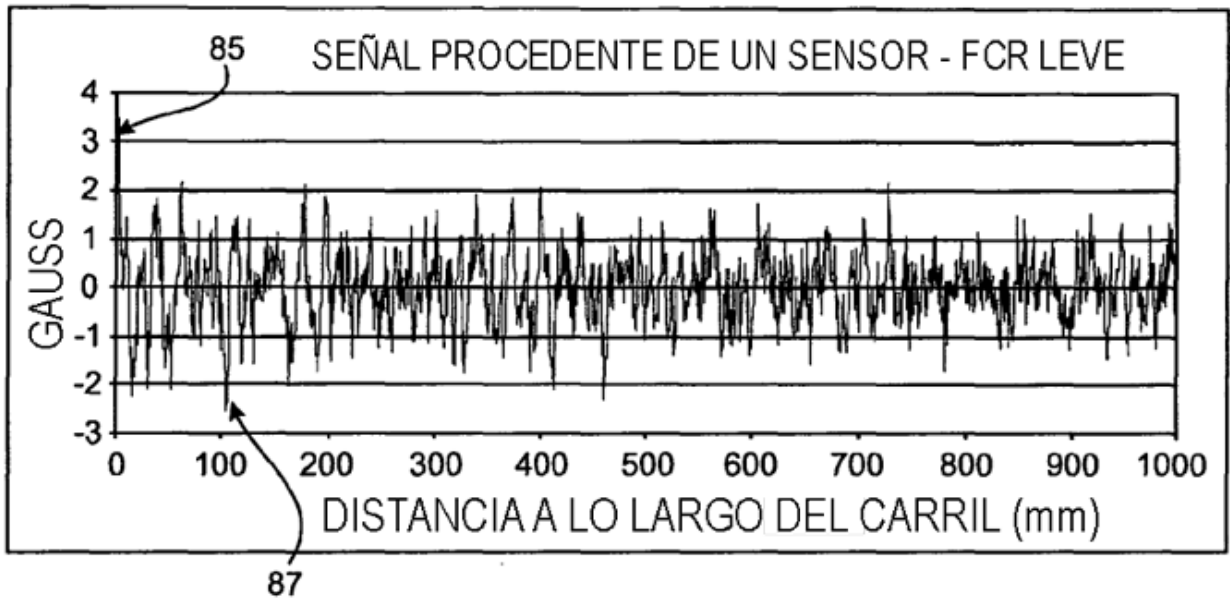


Fig. 4

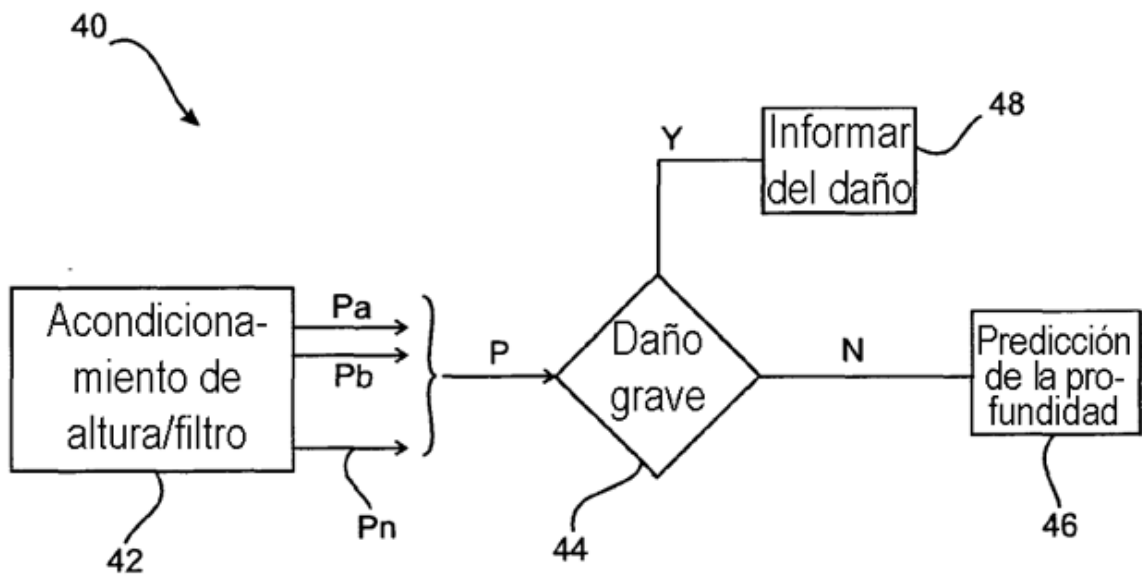


Fig. 5

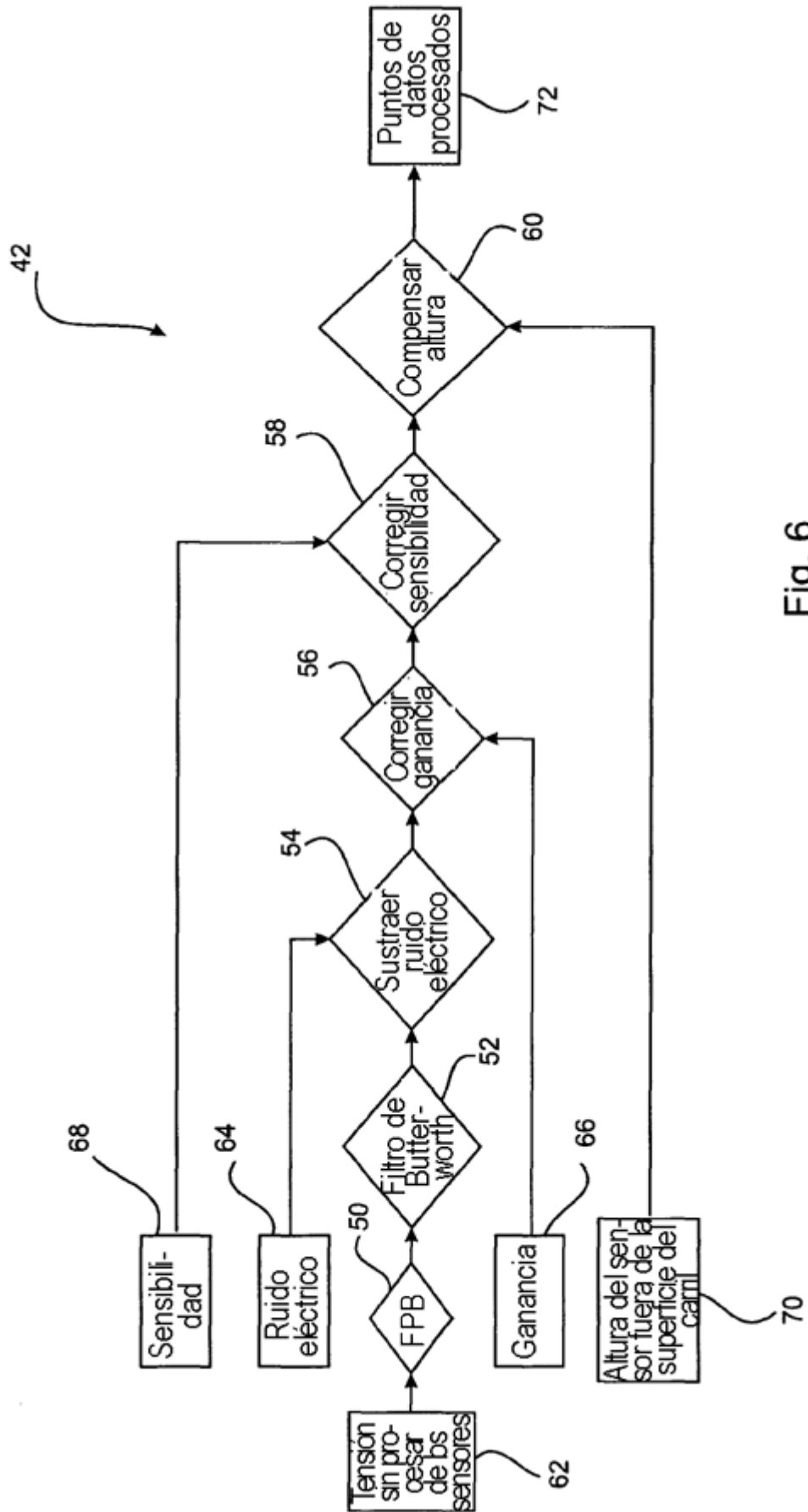


Fig. 6

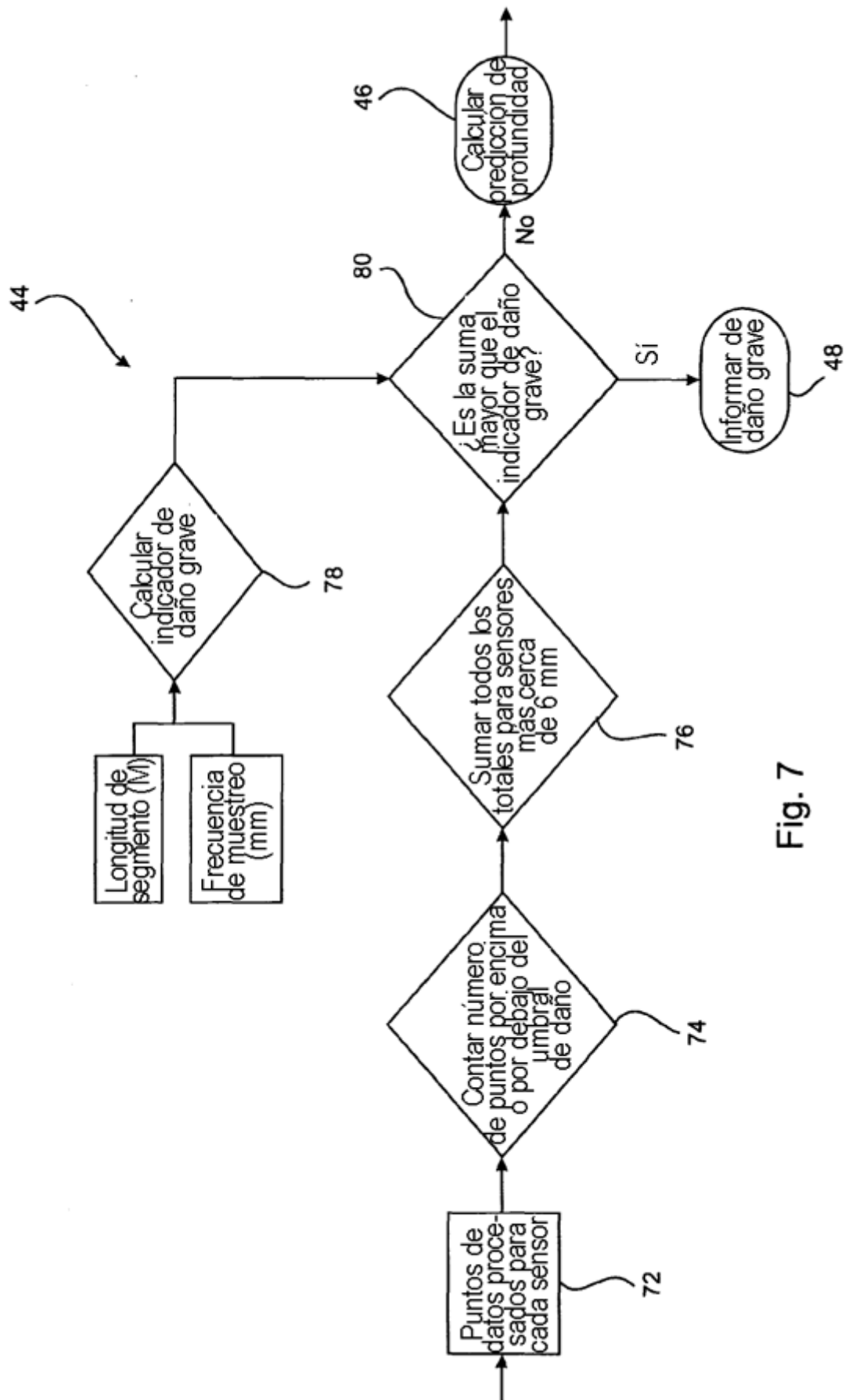


Fig. 7

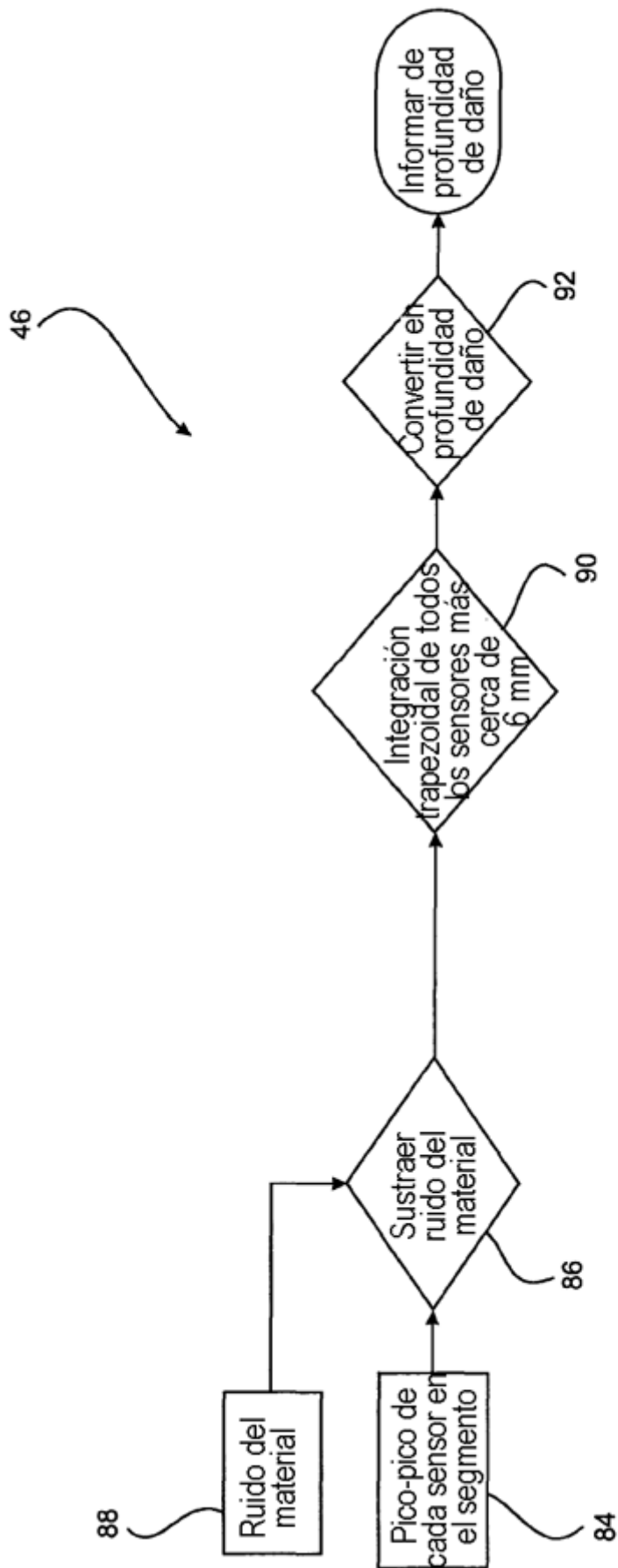


Fig. 8

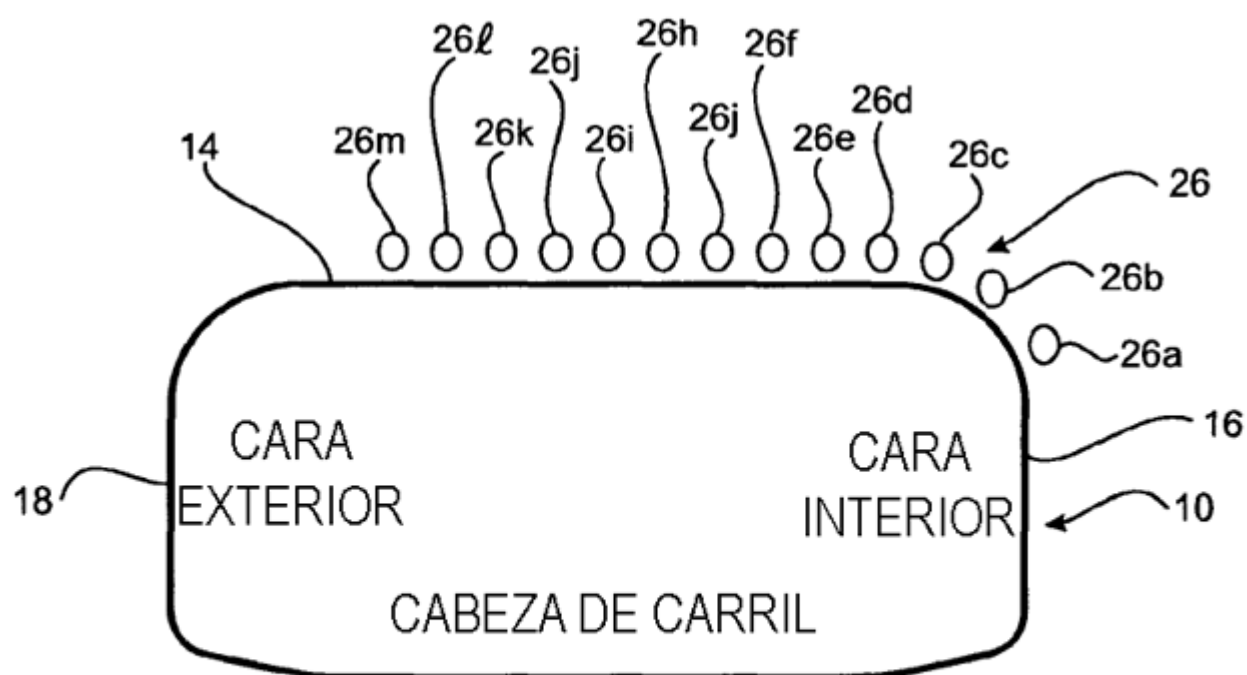


Fig. 9a

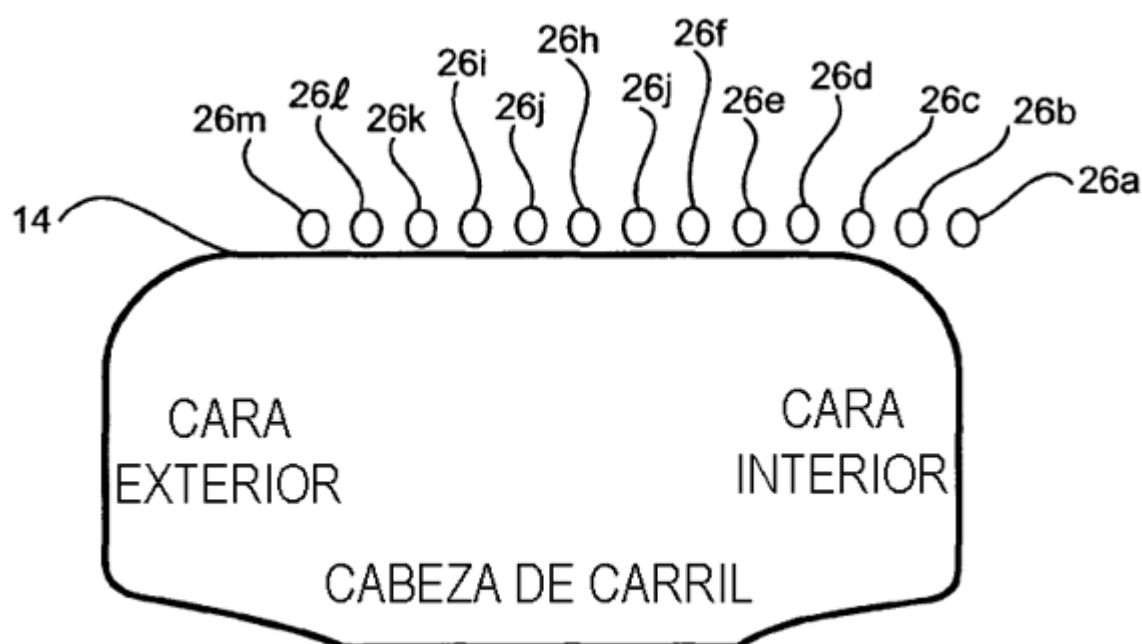


Fig. 9b

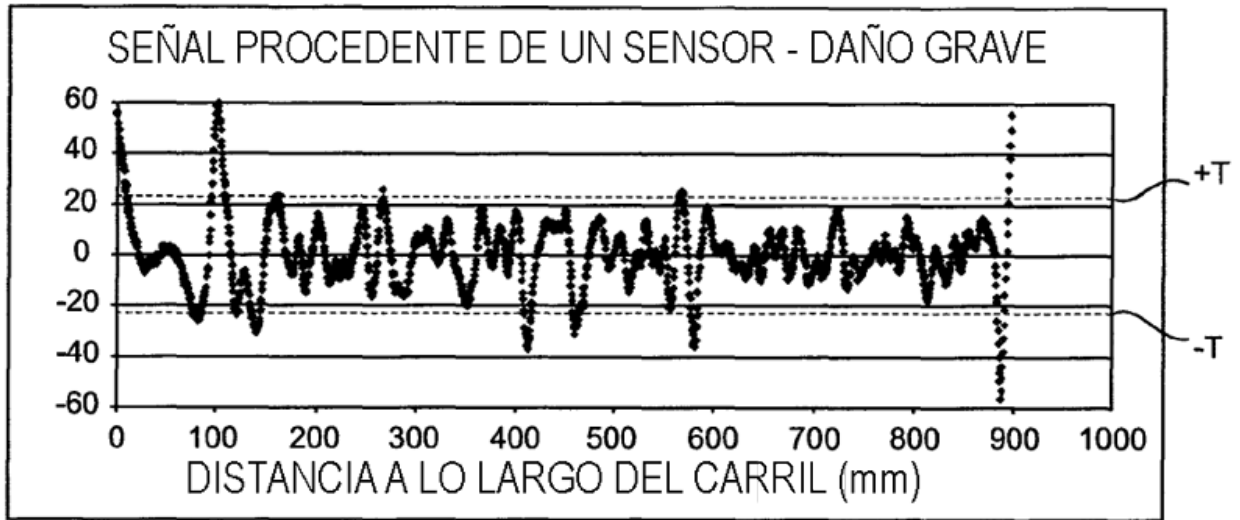


Fig. 10

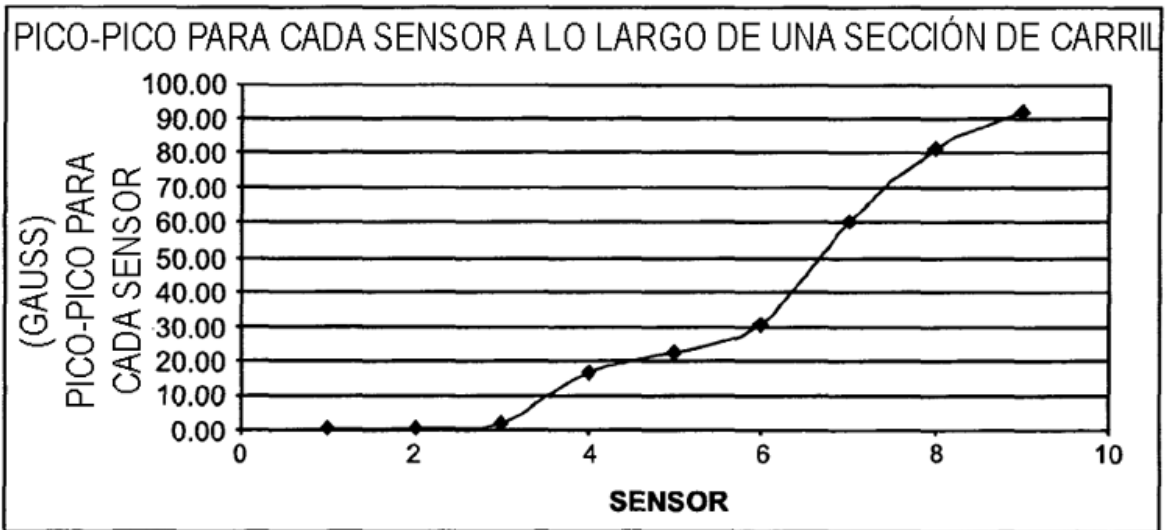


Fig. 11

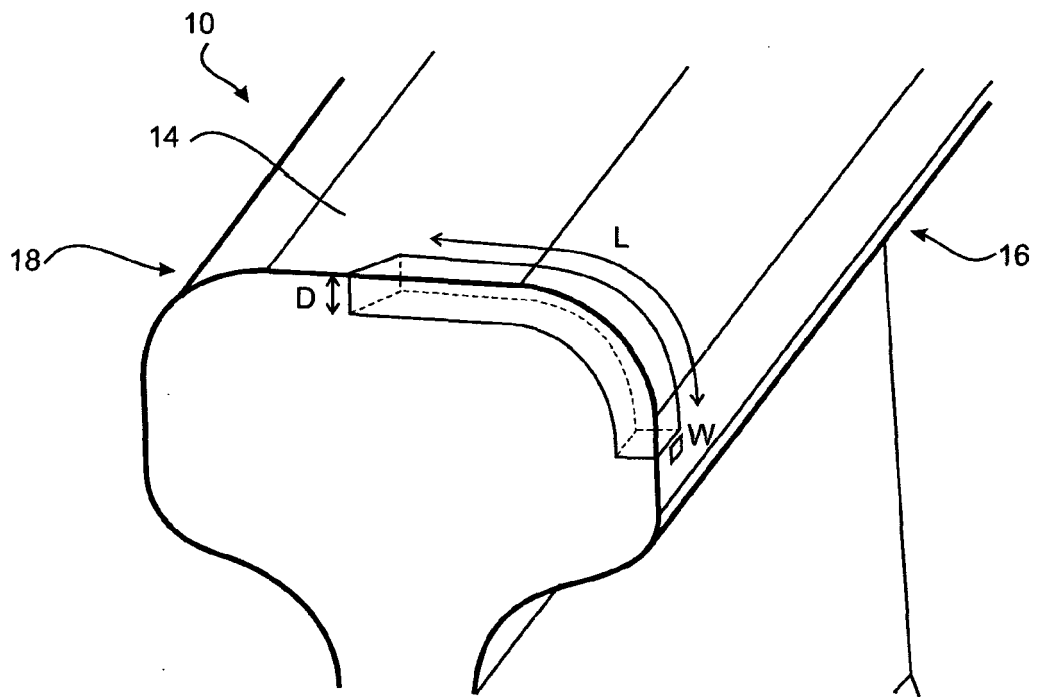


Fig. 12