

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 774 503**

51 Int. Cl.:

**G01L 1/00** (2006.01)

**G01L 5/00** (2006.01)

**G06F 17/50** (2006.01)

**G01N 3/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2016 PCT/JP2016/055065**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.09.2016 WO16140093**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2016 E 16758787 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.02.2020 EP 3267167**

54 Título: **Método de estimación de tensión residual y dispositivo de estimación de tensión residual**

30 Prioridad:

**05.03.2015 JP 2015043083**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**21.07.2020**

73 Titular/es:

**KABUSHIKI KAISHA KOBE SEIKO SHO (KOBE STEEL, LTD.) (100.0%)  
2-4 Wakinohama-Kaigandori 2-chome, Chuo-ku  
Kobe-shi, Hyogo 651-8585 , JP**

72 Inventor/es:

**OKITA, KEISUKE;  
NAKAGAWA, TOMOKAZU y  
YAMADA, MARIKO**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

ES 2 774 503 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 de estimación de tensión residual y dispositivo de estimación de tensión residual

### 5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un método de estimación de tensión residual y un dispositivo de estimación de tensión residual para estimar la tensión residual de una estructura basada en un método de deformación inherente.

### 10 **Antecedentes de la técnica**

La tensión residual generada en una estructura causa daños como grietas por fatiga en algunos casos y es importante comprender con precisión la distribución de la tensión residual en la estructura. Como método para estimar la tensión residual de una estructura, se conoce un método que incluye un análisis termoplástico-plástico parcial que se realiza sin calcular una deformación inherente (consulte el Documento de patente 1) y un método que utiliza un método de deformación inherente (por ejemplo, consulte los Documentos de patente 2 y 3).

En un método para estimar la tensión residual basado en el método de deformación inherente de la técnica relacionada, se cortan dos tipos de piezas cortadas de una estructura, se mide la deformación elástica o la tensión residual de cada pieza cortada, y el valor medido de la deformación elástica o la tensión residual de cada pieza cortada se aplica al proceso de análisis inverso basado en un método de elementos finitos. Un usuario ingresa un rango supuesto en el cual la deformación inherente se genera en la pieza cortada a un dispositivo de análisis que realiza un proceso de análisis inverso, como un rango de análisis. El dispositivo de análisis se aproxima a la distribución de deformación inherente con un método de mínimos cuadrados utilizando una función de distribución definida en el rango de análisis, determina la distribución de deformación inherente en el rango de análisis y calcula la tensión residual de la estructura a partir de la distribución de deformación inherente obtenida.

### **Lista de citas**

#### 30 Referencias de patente

Documento de Patente 1: EP 2 363 819 A1  
Documento de Patente 2: JP 2005 181172 A  
Documento de Patente 3: JP 2003 121273 A

35

### **Sumario de la invención**

#### **Problemas que resuelve la invención**

40 La precisión de la estimación de la tensión residual se ve muy afectada por el rango de análisis establecido. Por tanto, es importante establecer el rango de análisis adecuadamente. Sin embargo, convencionalmente, el usuario ha establecido el rango de análisis mediante prueba y error en función de la experiencia, y el rango de análisis apropiado no siempre se puede establecer.

45 La presente invención se realiza teniendo en cuenta las circunstancias anteriores y un objetivo principal de la misma es proporcionar un método de estimación de tensión residual y un dispositivo de estimación de tensión residual que pueda resolver los problemas anteriores.

#### **Medios para resolver los problemas**

50

Para resolver los problemas descritos anteriormente, de acuerdo con un aspecto de la invención, un método de estimación de la tensión residual incluye las características establecidas en la reivindicación 1.

55 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de adquirir condiciones relacionadas con el rango de análisis puede incluir la adquisición de una posición y un tamaño del rango de análisis como las condiciones relacionadas con el rango de análisis, y la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente puede incluir estimar la distribución de la deformación inherente en el rango de análisis especificado por la posición y el tamaño adquiridos.

60 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de adquirir el valor medido puede incluir adquirir deformación elástica y tensión residual medida en el punto de medición en el rango de análisis especificado por la posición y el tamaño adquiridos, como el valor medido.

65 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de adquirir condiciones relacionadas con el rango de análisis puede incluir la adquisición de información que define una pluralidad de regiones divididas que dividen el rango de análisis como las condiciones relacionadas con el rango de análisis, y la etapa de estimar la distribución de

la deformación inherente puede incluir determinar un parámetro de una función de distribución para aproximar la función de distribución, que es un conjunto de una pluralidad de funciones por partes definidas para cada una de la pluralidad de regiones divididas definidas por la información adquirida, a la distribución de deformación inherente del rango de análisis basado en el valor medido.

5 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente puede incluir determinar el parámetro de la función de distribución de modo que cada función por partes se haga continua en un límite de cada región dividida.

10 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente puede incluir la determinación del parámetro de la función de distribución en base a la interpolación de spline para que un gradiente de cada función por partes se haga continuo en un límite de cada región dividida.

15 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de mostrar los resultados del análisis puede incluir realizar un análisis elastoplástico en un modelo tridimensional que simule la estructura mediante un método de elementos finitos.

20 En el método de estimación de tensión residual, la etapa de mostrar los resultados del análisis puede incluir analizar la tensión generada por el procesamiento de la estructura basada en la teoría de contacto de Hertz.

Adicionalmente, de acuerdo con otro aspecto de la invención, un dispositivo de estimación de tensión residual incluye las características expuestas en la reivindicación 9.

#### **Ventajas de la invención**

25 De acuerdo con la presente invención, es posible establecer un rango de análisis apropiado sin depender de la experiencia del usuario.

#### **Breve descripción de los dibujos**

30 La figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra una configuración de una realización de un dispositivo de estimación de tensión residual según la presente invención.

La figura 2 es una vista lateral que ilustra una configuración de un árbol de cigüeñal.

La figura 3 es una vista lateral ampliada que ilustra el plástico que funciona para el árbol de cigüeñal.

35 La figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento de la realización de un método de estimación de tensión residual según la presente invención.

La figura 5A es una vista en perspectiva que ilustra un modelo de análisis.

La figura 5B es una vista que ilustra los resultados del análisis de un estado de distribución de deformación en el modelo de análisis ilustrado en la figura 5A.

40 La figura 6 es una vista que ilustra la determinación de una posición y un tamaño de un rango de análisis.

La figura 7 es una vista que ilustra la determinación de una región dividida en el rango de análisis.

La figura 8 es una vista en perspectiva que ilustra un ejemplo de una pieza cortada recogida de una estructura.

La figura 9 es una vista en sección transversal de un árbol de cojinete para ilustrar la colección de una pieza en C.

45 La figura 10 es una vista que ilustra un ejemplo de un problema de contacto para ilustrar la teoría de contacto de Hertz.

La figura 11 es una vista que ilustra una distribución de tensión supuesta cuando un cilindro y una placa plana ilustrada en la figura 10 están en contacto entre sí.

50 La figura 12A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial de filete en la Prueba 1.

La figura 12B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial del pasador en la Prueba 1.

La figura 12C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección radial del filete en la Prueba 1.

55 La figura 13A es una vista que ilustra un punto de medición en un método propuesto.

La figura 13B es una vista que ilustra un punto de medición en un método comparativo 3.

La figura 14A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del filete en la Prueba 2.

60 La figura 14B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del pasador en la Prueba 2.

La figura 14C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección radial del filete en la Prueba 2.

#### **Modos de llevar a cabo la invención**

65 A continuación, se describirán realizaciones preferidas de la presente invención, con referencia a los dibujos.

(Primera realización)

5 Un dispositivo de estimación de tensión residual de acuerdo con una primera realización de la presente invención está destinado a estimar la tensión residual de una estructura basada en un método de deformación inherente para un rango de análisis establecido por un usuario basado en una solución de análisis obtenida analizando la tensión generada en la estructura, sin usar un valor medido de la estructura.

10 [Configuración del dispositivo de estimación de tensión residual]

10 Un ordenador 10 realiza un dispositivo de estimación de tensión residual 1. Como se muestra en la figura 1, el ordenador 10 incluye un cuerpo principal 11, una unidad de entrada 12 y una unidad de visualización 13. El cuerpo principal 11 incluye una CPU 111, una ROM 112, una RAM 113, un disco duro 115, un dispositivo de lectura 114, una interfaz de entrada/salida 116, y una interfaz de salida de imagen 117, y la CPU 111, la ROM 112, la RAM 113, el disco duro 115, el dispositivo de lectura 114, la interfaz de entrada/salida 116 y la interfaz de salida de imagen 117 están conectadas por un bus.

20 La CPU 111 puede ejecutar un programa de ordenador cargado en la RAM 113. La CPU 111 ejecuta un programa de estimación de tensión residual 110 que es un programa informático para la estimación de tensión residual y, por lo tanto, el ordenador 10 funciona como el dispositivo 1 de estimación de tensión residual. El programa de estimación de tensión residual 110 es un programa de proceso de análisis inverso basado en un método de elementos finitos, y hace posible estimar un estado de distribución de deformación inherente en la estructura.

25 La ROM 112 está configurada por una ROM de máscara, una PROM, una EPROM, una EEPROM o similar y se graba con el programa informático para ser ejecutado por la CPU 111 y los datos utilizados para la misma.

30 La RAM 113 está configurada por una SRAM, una DRAM, o similar. La RAM 113 se usa para leer el programa de estimación de tensión residual 110 grabado en el disco duro 115. Cuando la CPU 111 ejecuta el programa de ordenador, la RAM se usa como un área de trabajo de la CPU 111.

35 El disco duro 115 se instala con varios programas de ordenador para ser ejecutados por la CPU 111, como el sistema operativo, el programa de aplicación y similares, y los datos utilizados para la ejecución de un programa de ordenador asociado. El programa de estimación de tensión residual 110 también está instalado en este disco duro 115.

40 El disco duro 115 se instala con un sistema operativo como Windows (marca registrada) fabricado y vendido por US Microsoft Co., por ejemplo. En la siguiente descripción, se supone que el programa de estimación de tensión residual 110 según esta realización funciona en el sistema operativo.

45 El dispositivo de lectura 114 está configurado por una unidad de disco flexible, una unidad de CD-ROM, una unidad de DVD-ROM, o similar, y puede leer el programa de ordenador o los datos grabados en un medio de grabación portátil 120. El programa de estimación de tensión residual 110 se almacena en el medio de grabación portátil 120 para hacer que el ordenador funcione como el dispositivo de estimación de tensión residual. El ordenador 10 puede leer el programa de estimación de tensión residual 110 del medio de grabación portátil 120 e instalar el programa de estimación de tensión residual 110 en el disco duro 115.

50 La interfaz de entrada/salida 116 está configurada por, por ejemplo, una interfaz en serie como un USB, un IEEE 1394, o un RS-232C, o similar, una interfaz paralela como un SCSI, un IDE, un IEEE 1284 o similar, y una interfaz analógica que incluye un convertidor D/A, un convertidor A/D y similares. La unidad de entrada 12 que incluye un teclado y un ratón está conectada a la interfaz de entrada/salida 116, y un usuario puede ingresar datos en el ordenador 10 usando la unidad de entrada 12.

55 La interfaz de salida de imagen 117 está conectada a la unidad de visualización 13 configurada por un LCD, un CRT, o similar, y una señal de video de acuerdo con los datos de imagen enviados desde la CPU 111 se emite a la unidad de visualización 13. La unidad de visualización 13 muestra una imagen (pantalla) de acuerdo con la señal de entrada de video.

[Principio para la estimación de la tensión residual basado en el método de deformación inherente]

60 (1) Cálculo de la tensión residual utilizando deformación inherente

Cuando la deformación inherente es  $\epsilon_0$ , la tensión residual  $\sigma$  se expresa mediante la siguiente expresión.

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) \quad (1)$$

65 D representa una matriz de coeficientes elásticos y  $\epsilon$  representa todas las deformaciones que satisfacen la relación

de la siguiente expresión. [Ecuación 1]

$$\int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) dV = \mathbf{0} \quad (2)$$

5 En el presente documento,  $\int dV$  representa una integral de volumen en la región de análisis y B representa una matriz de coeficientes para relacionar un desplazamiento de nodo u y  $\boldsymbol{\varepsilon}$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}u \quad (3)$$

10 En un caso donde se conoce la deformación inherente, la tensión residual se obtiene como sigue.

Las siguientes expresiones provienen de las ecuaciones (2) y (3).  
[Ecuación 2]

15 [Ecuación 2]

$$\mathbf{K}u = \mathbf{P} \quad (4)$$

donde,

20

$$\mathbf{K} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_0 dV \quad (6)$$

K representa una matriz de rigidez y P representa un vector de carga generado por la deformación inherente.

25 Cuando se obtiene u resolviendo la ecuación (4), la tensión residual se puede obtener de las ecuaciones (3) y (1).

(2) Cálculo de la deformación inherente utilizando la tensión residual medida

30 N los valores de tensión residual medidos se expresan como  $\sigma_m$ . Correspondientemente, los valores de tensión residual calculada N obtenidos de la deformación inherente se expresan como  $\sigma_c$ , y un residuo R entre la tensión residual calculada y la tensión residual medida se define mediante la siguiente expresión.  
[Ecuación 3]

$$R = (\sigma_m - \sigma_c)^T (\sigma_m - \sigma_c) \quad (7)$$

35

La deformación inherente en un cierto punto se expresa como la siguiente función lineal por los parámetros a de la función de distribución M.

[Ecuación 4]

40

$$\boldsymbol{\varepsilon}_0 = \mathbf{M}a \quad (8)$$

donde M representa una función de coordenadas y las coordenadas pueden no ser lineales.

45 Cuando la deformación inherente está determinada por la Ecuación (8), la tensión residual medida se obtiene por el método de (1) anterior y como resultado, se obtiene una ecuación de relación lineal como sigue.

[Ecuación 5]

$$\sigma_c = \mathbf{H}a \quad (9)$$

50 donde H representa una matriz de coeficientes y el componente de la misma puede obtenerse obteniendo tensión residual al dar un valor unitario a cada componente de a.

55 Cuando la Ecuación (9) se sustituye por la Ecuación (7) y se determina a tal que R es el mínimo, se determina una distribución de deformación inherente donde se determina un error entre la tensión residual medida y la tensión residual calculada en el punto de medición.

[Operación del dispositivo de estimación de tensión residual]

60 A continuación, se describirá el funcionamiento del dispositivo 1 de estimación de tensión residual según la realización.

El dispositivo de estimación de tensión residual 1 realiza el procesamiento de estimación de tensión residual como se describe a continuación para estimar la tensión residual de la estructura.

5 En el presente documento, se describirá un árbol de cigüeñal como ejemplo de la estructura. Como se muestra en la figura 2, un árbol de cigüeñal 200 está configurado de tal manera que un árbol de cojinete 201 y un árbol de pasador 203 están conectados por un brazo de manivela 202. En el lugar de conexión del árbol de cojinete 201 y el brazo de manivela 202 y el lugar de conexión del árbol de pasador 203 y el brazo de manivela 202, se genera una fácilmente gran tensión en uso. Cuando se genera tensión residual de tensión en estos lugares de conexión, se pueden causar 10 daños tales como grietas por fatiga. Para mejorar la vida de fatiga, el trabajo plástico como el procesamiento de rodillo o el granallado se realiza en los lugares de conexión y se introduce tensión residual de compresión.

La figura 3 es una vista que ilustra el plástico que funciona con respecto al árbol de cigüeñal. En la figura 3, se ilustra un caso de procesamiento de rodillo. En el procesamiento de rodillos, en un estado donde un rodillo 300 se presiona 15 contra el lugar de conexión del árbol 201 (o el árbol de pasador 203) y el brazo de manivela 202, el árbol de cojinete 201 se gira. Por tanto, en el lugar de conexión, se forma un filete 204 y se aplica tensión residual de compresión de manera que la tensión residual se distribuye en la dirección circunferencial del árbol de cojinete 201.

Tal y como se ha descrito anteriormente, la tensión residual de la estructura que se somete a trabajo plástico se 20 estima utilizando el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento de un método de estimación de tensión residual según la realización.

Primero, la CPU 111 ejecuta un proceso de análisis teórico de la estructura (etapa S1).

25 El proceso de análisis teórico es un proceso de análisis de la tensión en la estructura sin utilizar el valor medido de la estructura. Más específicamente, se utiliza un análisis elastoplástico basado en el método de elementos finitos. En el proceso de análisis teórico, la CPU 111 realiza una simulación de procesamiento para un modelo tridimensional de la estructura en las mismas condiciones de procesamiento que las condiciones reales, y analiza el estado de 30 distribución de la deformación en la estructura.

Se describirá un ejemplo de un modelo tridimensional (modelo de análisis). Cuando se simulan las condiciones de procesamiento de rodillo de una máquina real y se gira un rollo mientras se considera un contacto con el filete, se 35 analizó la tensión residual en una porción de filete del árbol de cigüeñal. La figura 5A es una vista en perspectiva que ilustra un modelo de análisis. Se considera una forma axialmente simétrica, el modelo de análisis se modela a 30° en la dirección circunferencial, y se aplican condiciones simétricas en la dirección circunferencial a una cara extrema circunferencial. La figura 5B es una vista que ilustra los resultados del análisis del estado de distribución de deformación en el modelo de análisis ilustrado en la figura 5A. En la figura 5B, un plano central (sección en la 40 posición de 15°) en la dirección circunferencial del modelo de análisis se toma como una sección de evaluación, y se muestran los resultados del análisis de la tensión en esta sección de evaluación.

A continuación, la CPU 111 muestra los resultados del análisis del proceso de análisis teórico en la unidad de 45 visualización 13 (etapa S2). En el proceso de la etapa S2, la CPU 111 hace que la unidad de visualización 13 muestre una pantalla a través de la cual un usuario puede comprender el estado de distribución de la tensión en el modelo tridimensional. Ejemplos de los mismos incluyen una pantalla gráfica que clasifica por color el estado de distribución de la deformación en la sección del modelo tridimensional dependiendo del nivel de intensidad de la deformación, y similares.

En la etapa S2, es preferible mostrar una línea de contorno para cada nivel de intensidad de deformación. Por tanto, 50 es fácil para un usuario determinar la región dividida del rango de análisis que se describirá a continuación.

Un usuario determina las condiciones relacionadas con el rango de análisis donde se estima la tensión residual, es decir, la posición y el tamaño del rango de análisis, cada región dividida del rango de análisis, y un punto de medición de tensión residual, con referencia a la pantalla de resultados de análisis del proceso de análisis teórico (etapa S3). 55

En el proceso de análisis teórico, no es posible estimar con precisión la tensión, pero es posible estimar aproximadamente con precisión una región generadora de tensión. Por lo tanto, un usuario puede verificar el estado de distribución de la tensión mediante la pantalla de resultados del análisis del proceso de análisis teórico y luego 60 determinar la posición y el tamaño del rango de análisis adecuado para estimar la tensión residual.

La determinación de la posición y el tamaño del rango de análisis se describirá en detalle con referencia a la figura 6. La figura 6 ilustra el nivel de intensidad de la tensión obtenida por el proceso de análisis teórico, mediante sombra gris. Un usuario puede obtener fácilmente un rango de análisis apropiado determinando la posición y el tamaño del 65 rango de análisis para rodear una región donde se genera la tensión.

Como se describirá más adelante, la distribución de deformación inherente se estima utilizando una función de

distribución. Convencionalmente, en la función de distribución, se utiliza una expresión expandida en serie en todo un rango de análisis. Es decir, se define una función de distribución para un rango de análisis. Por tanto, a menudo, la función de distribución convencional puede no tratar el sesgo de la distribución de deformación inherente en el rango de análisis, y puede no reproducir con precisión una distribución de deformación inherente real. Por lo tanto, el dispositivo de estimación de tensión residual 1 divide el rango de análisis en una pluralidad de regiones divididas, y define la función de distribución como un conjunto de una función por partes definida como la región dividida. Si una pequeña región dividida se establece en una porción donde un cambio en la deformación inherente es empinada y una gran región dividida se establece en una porción donde un cambio en la deformación inherente es suave, Es posible hacer coincidir con precisión la función de distribución con la forma de distribución de la deformación inherente en cada región dividida. Por tanto, un usuario puede verificar el estado de distribución de la tensión mediante la pantalla de resultados del análisis del proceso de análisis teórico, y puede determinar adecuadamente cada región dividida en el rango de análisis.

La región dividida en el rango de análisis se describirá en detalle con referencia a la figura 7. En la figura 7, la línea de contorno se marca para cada nivel de intensidad de deformación obtenida por el proceso de análisis teórico. Un cambio en la deformación es pronunciado en una porción donde el intervalo entre las líneas de contorno es estrecho, y un cambio en la deformación es suave en una porción donde el intervalo entre las líneas de contorno es amplio. Un usuario divide una región de acuerdo con el intervalo entre las líneas de contorno, de modo que la región dividida se reduce en una porción donde el intervalo entre las líneas de contorno es estrecho y la región dividida se incrementa en una porción donde el intervalo entre las líneas de contorno es amplio, facilitando así la obtención de una región dividida apropiada.

En este caso, es preferible que un usuario determine el mismo número de puntos de medición para cada región dividida. Por tanto, es posible hacer frente a un cambio abrupto en la deformación inherente en la región dividida pequeña y hacer frente a un cambio suave en la deformación inherente en la región dividida grande.

La tensión residual de la estructura se estima en función de la tensión residual (o deformación elástica) de la pieza de corte medida. Por tanto, la ubicación del punto de medición afecta significativamente la precisión de la estimación de la tensión residual de la estructura. Si una porción donde el valor de la deformación inherente es alto, una porción donde la distribución de la deformación inherente se cambia abruptamente o se establece un punto similar como el punto de medición, es posible estimar con precisión la tensión residual. Por lo tanto, un usuario puede verificar el estado de distribución de la deformación inherente mediante la pantalla de resultados del análisis del proceso de análisis teórico, y determinar una porción adecuada para medir la tensión residual (o deformación elástica) de la pieza cortada como el punto de medición.

La porción donde el valor de la deformación inherente es alto, la porción donde la distribución de la deformación inherente cambia abruptamente o similar puede ser una porción adecuada para estimar la tensión residual. Es decir, el rango de análisis adecuado para estimar la tensión residual incluye una porción adecuada para medir la tensión residual (o deformación elástica) de la pieza cortada. Por lo tanto, el usuario determina el punto de medición en el rango de análisis.

Un usuario corta la estructura, recoge una pieza cortada de una porción determinada como el punto de medición y mide la tensión residual de la pieza cortada (etapa S4). Generalmente, la estructura se corta finamente en una dirección para recoger una pieza cortada (pieza T) y se corta finamente en una dirección perpendicular a la única dirección para recoger una pieza cortada (pieza L).

En este caso, la tensión residual es un valor obtenido multiplicando la deformación elástica por un módulo de Young, y medir la deformación elástica es equivalente a medir la tensión residual. En consecuencia, se puede medir la deformación elástica o la tensión residual de la pieza cortada. En la realización, se describirá un caso de medición de la tensión residual.

Como se muestra en la figura 8, en el caso de una estructura simétrica de eje, como un árbol de cojinete o un árbol de pasador, al cual la tensión residual de compresión se aplica uniformemente en la dirección circunferencial, se obtiene una pieza en T cortando la estructura en dirección radial. Si la deformación inherente se distribuye uniformemente en la dirección circunferencial, incluso en un caso donde se obtiene una pieza T de cualquier porción en la dirección circunferencial, la deformación inherente no cambia. En consecuencia, la pieza en T que se recogerá puede ser solo una. En consecuencia, se puede reducir el número de piezas en T que se deben recoger. Por tanto, es posible reducir la carga de trabajo del proceso de corte y la medición de la tensión residual de la pieza cortada.

Por otra parte, la distribución de deformación inherente en la dirección de la longitud del eje es complicada. En consecuencia, es necesario recoger la pieza L en una pluralidad de lugares en la dirección de la longitud del árbol.

En el caso de tener una superficie doblada como la porción de filete del árbol de cigüeñal, en lugar de la pieza L, una pieza de corte cónico (en adelante, referida como "pieza C") se puede recoger el corte en una dirección normal a la superficie doblada. Adicionalmente, la pieza L y la pieza C no se recogen y solo se puede recoger la pieza T. En la figura 9, cada vista es una vista en sección transversal cuando el árbol de cojinete se corta en la dirección

5 longitudinal del eje de rotación. La pieza AC 500 se obtiene cortando la estructura en una dirección normal a la superficie doblada del filete, es decir, en la dirección del radio del filete en forma de arco en la sección. Como el árbol de cojinete tiene una forma de eje simétrico, una cara cortada 501 de la pieza C 500 se extiende cónicamente alrededor del eje central de rotación del árbol de cojinete. Se recogen varias piezas en C cambiando el ángulo central del filete (por ejemplo, de 20° a 110° con un paso de 10°).

10 En un caso donde la tensión residual de compresión se aplica uniformemente a una estructura en forma de barra larga en una dirección en la dirección longitudinal, solo se puede recoger una pieza en T en un lugar en la dirección longitudinal.

15 El usuario mide directamente la tensión residual de la pieza cortada recogida como se describe anteriormente con rayos X o similares. En el caso de medir la deformación elástica, el usuario conecta un calibrador de tensión a la pieza cortada y corta aún más la pieza cortada en una pluralidad de piezas pequeñas para medir la deformación liberada (deformación elástica) de cada pieza pequeña. En la medición de la tensión residual o la deformación liberada (deformación elástica), se mide una pluralidad de componentes que son diferentes entre sí.

20 Se hace referencia nuevamente a la figura 4. El usuario ingresa la posición y el tamaño del rango de análisis determinado en el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La CPU 111 del dispositivo de estimación de tensión residual 1 recibe la posición y el tamaño de la entrada del rango de análisis desde la unidad de entrada 12 (etapa S5).

25 A continuación, el usuario ingresa un patrón de división (información sobre la posición de división) del rango de análisis en el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La CPU 111 del dispositivo de estimación de tensión residual 1 recibe el patrón de división de la entrada de la región de análisis desde la unidad de entrada 12 (etapa S6).

30 A continuación, el usuario ingresa el valor medido de la tensión residual en el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La CPU 111 del dispositivo de estimación de tensión residual 1 recibe la entrada del valor medido desde la unidad de entrada 12 (etapa S7).

35 A continuación, la CPU 111 determina la función de distribución (etapa S8). La función de distribución se define como un conjunto de una pluralidad de funciones por partes definidas para cada región dividida del rango de análisis. Para cada función por partes, se puede seleccionar un cierto polinomio de orden múltiple. Sin embargo, para obtener resultados de estimación que reflejen correctamente el estado de distribución de la deformación inherente, el orden de cada función por partes se hace preferiblemente común. En consecuencia, es posible hacer frente a un cambio en la deformación inherente suave en una región dividida grande, mientras hace frente a un cambio en la deformación inherente empujada en una pequeña región dividida. Adicionalmente, como se describirá más adelante, el orden de cada función por partes se hace común incluso en el caso de realizar interpolación de spline.

40 La CPU 111 puede seleccionar automáticamente la función de distribución o el usuario puede designar una función de distribución utilizando la unidad de entrada 12. En el dispositivo de estimación de tensión residual 1, la función de distribución se puede establecer de antemano.

45 A continuación, la CPU 111 optimiza los parámetros de la función de distribución (etapa S9). A continuación, se describirá en detalle el procesamiento de la etapa S9.

La CPU 111 primero determina H en la Expresión (9). El procedimiento del mismo es el siguiente.

- 50 (a)  $a = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$  se establece y se obtiene  $\varepsilon_0 = Ma$ .  
 (b) Se resuelve la expresión (4) y se obtiene u.  
 (c)  $\varepsilon$  se obtiene mediante la Expresión (3).  
 (d)  $\sigma$  se obtiene mediante la Expresión (1).  
 55 (e) Los valores de N correspondientes al punto de medición de la tensión residual se extraen de los componentes de  $\sigma$  y los valores extraídos se establecen en una primera columna de H.  
 (f)  $a = [0, 1, 0, \dots, 0]^T$  se establece y también se obtiene una segunda columna de H en el mismo procedimiento de (b) a (f).

60 A continuación, la CPU 111 determina tal que R de Expresión (7) es el mínimo. En consecuencia, los parámetros de la función de distribución están optimizados.

65 En el procesamiento de la etapa S9, la CPU 111 determina preferiblemente los parámetros de la función de distribución de modo que el gradiente de cada función por partes es continuo por la interpolación de spline. Por tanto, la deformación inherente puede continuar suavemente en un límite de la región dividida, y se puede obtener un valor estimado de la deformación inherente sin afectar las propiedades físicas.

Adicionalmente, la CPU 111 calcula un valor estimado de la tensión residual (etapa S10).

5 En el procesamiento de la etapa S10, primero, la CPU 111 obtiene la deformación inherente de un cierto punto mediante la Expresión (8). Adicionalmente, la CPU 111 obtiene  $u$  resolviendo la Expresión (4) y la  $u$  obtenida se aplica a la Expresión (3) para obtener  $\epsilon$ . A continuación, el  $\epsilon$  obtenido se aplica a la Expresión (1) para obtener  $\sigma$ .

A continuación, la CPU 111 muestra el valor estimado de la tensión residual obtenida en la unidad de visualización 13 (etapa S11).

10 Después de la etapa S11, la CPU 111 finaliza el procesamiento.

(Segunda realización)

15 El dispositivo de estimación de tensión residual según esta realización analiza la tensión generada por el procesamiento de la estructura basada en la teoría de contacto de Hertz, en el proceso de análisis teórico (etapa S1).

20 Como la configuración restante del dispositivo de estimación de tensión residual según la presente realización es la misma que la configuración del dispositivo de estimación de tensión residual 1 según la primera realización, no se repetirá una descripción detallada de los mismos.

25 Se describirá el proceso de análisis teórico en el dispositivo de estimación de tensión residual según esta realización. La teoría de contacto de Hertz se utiliza para analizar la tensión en el punto de contacto o contacto de línea con dos cuerpos elásticos. En este caso, se describirá un caso donde la teoría de contacto de Hertz se aplica al procesamiento de rodillo del árbol de cigüeñal.

30 El procesamiento de rodillo es un tipo de trabajo de plástico. Aunque no es posible calcular la tensión cuando se produce una deformación plástica por la teoría de contacto de Hertz, es posible estimar la deformación plástica, es decir, una región donde se produce la deformación plástica.

Se considera un problema de contacto entre el cilindro y la placa plana como se ilustra en la figura 10. La figura 11 es una vista que ilustra una distribución de tensión supuesta cuando el cilindro y la placa plana ilustrada en la figura 10 están en contacto entre sí.

35 La distribución de cada componente de tensión en una dirección de profundidad justo debajo del contacto ( $x = 0$ ) es como se muestra en una porción de sombreado de la figura 11, y está representada por las Expresiones (10) a (14). [Ecuación 6]

$$(\sigma_x)_{x=0} = -p_0 \frac{b}{\sqrt{b^2 + z^2}} \left[ 1 - \frac{2z}{b} \left( \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right) \right] \quad (10)$$

40

$$(\sigma_y)_{x=0} = -p_0 \frac{2vb}{\sqrt{b^2 + z^2}} \left[ 1 - \frac{z}{b} \left( \sqrt{1 + \frac{z^2}{b^2}} - \frac{z}{b} \right) \right] \quad (11)$$

$$(\sigma_z)_{x=0} = -p_0 \frac{b}{\sqrt{b^2 + z^2}} \quad (12)$$

45

$$\tau_1 = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)_{x=0}}{2} \quad (13)$$

$$\tau_2 = \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_z)_{x=0} \quad (14)$$

$$b^2 = \frac{4}{\pi} r_0 \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) q \quad (15)$$

$$p_0^2 = \frac{1}{\pi} \frac{q}{r_0} \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}} \quad (16)$$

$$p = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}} \quad (17)$$

5

En este caso,  $E_1$  y  $E_2$  son módulos de elasticidad longitudinal,  $\nu_1$  y  $\nu_2$  son la relación de Poisson,  $P$  es carga concentrada,  $q$  es la carga de línea por unidad de longitud,  $p$  es presión sobre una superficie de contacto,  $p_0$  es la presión máxima generada en un centro de la superficie de contacto,  $r_0$  es un radio del cilindro, y  $2b$  es un ancho de un rectángulo de la superficie de contacto. Adicionalmente,  $p$ ,  $p_0$  y  $b$  se obtienen de las expresiones (15) a (17).

10

En este caso, de acuerdo con la teoría de la tensión cortante máximo que es la condición de rendimiento de Tresca, el límite elástico de la tensión uniaxial de un material es  $\sigma_y$ , y el rendimiento comienza cuando la tensión cortante  $\tau$  que actúa sobre el material satisface la Expresión (18) (se genera deformación plástica).

15

[Ecuación 7]

$$\sigma_y = 2\tau \quad (18)$$

20

Por lo tanto, para la placa plana, la expresión (19) se obtiene de las expresiones (10), (12), (13) y (18), y la profundidad  $z$  desde la superficie en la expresión (19) es una profundidad de endurecimiento, es decir, la región donde se genera la deformación plástica (deformación inherente).

[Ecuación 8]

$$\sigma_y = \frac{2p_0}{b} \left( z - \frac{z^2}{\sqrt{b^2 + z^2}} \right) \quad (19)$$

25

Los resultados del análisis obtenidos por el proceso de análisis teórico utilizando la teoría de contacto de Hertz descrita anteriormente se muestran en la unidad de visualización 13 en la etapa S2. En este momento, la tensión se puede mostrar en una línea de contorno para cada nivel de intensidad.

30

Dicha configuración permite al usuario verificar los resultados del análisis del proceso de análisis teórico, por lo tanto, determinar adecuadamente la posición y el tamaño del rango de análisis que es el rango para estimar la tensión residual, cada región dividida del rango de análisis y el punto de medición de la tensión residual (o deformación elástica) de la pieza cortada, sin depender de la experiencia.

35

(Otras realizaciones)

40

En las realizaciones primera y segunda descritas anteriormente, se ha descrito una configuración que se basa en los resultados del análisis del proceso de análisis teórico y donde un usuario determina la posición y el tamaño del rango de análisis, cada región dividida del rango de análisis, y el punto de medición de la tensión residual de la pieza cortada, e ingresa la posición y el tamaño del rango de análisis, cada región dividida del rango de análisis, y el valor medido de la tensión residual en el punto de medición en el dispositivo de estimación de tensión residual respectivamente, pero la invención no se limita a los mismos. Con base en los resultados del análisis del proceso de análisis teórico, el usuario puede determinar al menos una de las posiciones y tamaños del rango de análisis, cada región dividida del rango de análisis y el punto de medición de la tensión residual de la pieza cortada. Cuando el usuario determina la posición y el tamaño del rango de análisis, el dispositivo de estimación de tensión residual recibe la posición y el tamaño del rango de análisis que se ingresan al mismo, y estima la tensión residual en función de la deformación inherente en este rango de análisis. Cuando el usuario determina cada región dividida del rango de análisis, el dispositivo de estimación de tensión residual recibe el patrón de división del rango de análisis que se

45

ingresa al mismo, y estima la tensión residual en función de la deformación inherente, usando la función de distribución que es el conjunto de la función por partes definida para cada región dividida. Cuando el usuario determina el punto de medición de la tensión residual, el dispositivo de estimación de tensión residual recibe el valor medido de la tensión residual en el punto de medición determinado que se ingresa al mismo, aproxima la deformación inherente en función del valor medido de entrada y estima la tensión residual de la estructura.

Adicionalmente, en las realizaciones primera y segunda descritas anteriormente, se ha descrito una configuración donde se aplica la interpolación de spline para determinar el parámetro de la función de distribución, pero la invención no se limita a los mismos. El parámetro de cada función por partes se puede determinar sin utilizar la interpolación spline. En este caso, la interpolación de Lagrange se puede aplicar para determinar el parámetro de cada función por partes. En consecuencia, cada función por partes puede hacerse continua en el límite de la región dividida. Adicionalmente, es posible definir una función analítica de una serie polinómica o trigonométrica de orden múltiple en una región de análisis completa y aplicar la interpolación de Lagrange para optimizar el parámetro de esta función de distribución. Del mismo modo, en el caso de utilizar la interpolación de Lagrange, Es posible hacer frente al sesgo de la distribución de la deformación inherente, suponiendo que el número de puntos de medición en cada región dividida es el mismo.

Adicionalmente, en las realizaciones primera y segunda descritas anteriormente, se ha descrito una configuración donde un usuario ingresa la condición para el rango de análisis (la posición y el tamaño del rango de análisis, la región dividida del rango de análisis y el punto de medición de la tensión residual de la pieza cortada) en el dispositivo de estimación de tensión residual, pero la invención no se limita a los mismos. El dispositivo de estimación de tensión residual puede establecer automáticamente la condición para el rango de análisis, basado en los resultados del análisis del proceso de análisis teórico.

Adicionalmente, en las realizaciones primera y segunda descritas anteriormente, se ha descrito una configuración donde la tensión residual se mide a partir de la pieza cortada de la estructura y el parámetro de la función de distribución se optimiza de tal manera que la diferencia entre la tensión residual medida y la tensión residual calculada por la función de distribución es el mínimo, pero la invención no se limita a los mismos. Una configuración donde la deformación liberada (deformación elástica) se mide a partir de la pieza cortada de la estructura y el parámetro de la función de distribución se optimiza de tal manera que la diferencia entre la deformación liberada medida y la deformación elástica calculada por la función de distribución es la mínima puede ser adoptada. En este caso, la determinación del punto de medición de la deformación elástica es la misma que la determinación del punto de medición de la tensión residual en la primera y segunda realizaciones.

(Prueba de evaluación)

El o los inventores realizaron pruebas de evaluación del rendimiento del método de estimación de la tensión residual descrito en las realizaciones anteriores. En esta prueba de evaluación, un valor de respuesta correcto de la tensión residual utilizó los resultados del análisis del análisis FEM (método de elementos finitos) existente, realizó un experimento numérico mediante un método de estimación de tensión residual (en adelante, denominado "método propuesto") utilizando un rango de análisis que se establece en función de los resultados del análisis mediante el proceso de análisis teórico, y compara el valor de respuesta correcto con los resultados numéricos del experimento.

En esta prueba de evaluación, la tensión residual en un eje del pasador del árbol de cigüeñal se estimó mediante el modelo de análisis que se muestra en la figura 5A. El plano central (sección en una posición de 15°) en la dirección circunferencial del modelo de análisis se tomó como la sección de evaluación, y los resultados en la sección de evaluación se usaron como el valor de respuesta correcto.

En el experimento numérico, se considera que usa un valor de deformación inherente en la misma condición (posición, componente) como un caso de medición real. Después de simular el procesamiento de rodillo, se recogieron piezas T y C en el análisis FEM y se realizó un análisis de liberación de tensión para obtener la tensión residual correspondiente a la medición real.

(1) Prueba 1

En el método propuesto, cuando se obtiene el análisis por el proceso de análisis teórico que se muestra en la figura 6 (ángulo de filete = 40°), se establecieron la posición y el tamaño del rango de análisis para rodear la región generadora de tensión indicada en los resultados del análisis (el rango de análisis se muestra en la figura 6). Tanto cuando se estableció el rango de análisis más grande que el método propuesto (en lo sucesivo denominado "método comparativo 1") y cuando se estableció el rango de análisis más pequeño que el método propuesto (en adelante denominado "método comparativo 2"), la tensión residual fue estimado y comparado con los resultados del método propuesto. En la siguiente tabla, las condiciones de establecimiento del rango de análisis en el método propuesto, se muestran el método comparativo 1 y el método comparativo 2.

[Tabla 1]

	$\alpha_0[^\circ]$	$\Delta\alpha[^\circ]$	R2[mm]
Método comparativo 1	0	120	20
Método comparativo 2	30	70	2
Método propuesto	20	80	6

Las figuras 12A a 12C son gráficos que muestran los resultados de la Prueba 1. La figura 12A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial de filete, La figura 12B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial del pasador, y la figura 12C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección radial del filete. En las figuras 12A a 12C, un eje vertical muestra la magnitud de la tensión residual, y un eje horizontal muestra la profundidad desde la superficie. Adicionalmente, en cada gráfico, la línea continua gris muestra el valor de respuesta correcto, la línea punteada negra muestra los resultados del experimento numérico por el método comparativo 1, la línea discontinua gris muestra los resultados del experimento numérico por el método comparativo 2, y la línea continua negra muestra los resultados del experimento numérico por el método propuesto.

El método propuesto ha obtenido resultados muy cercanos al valor de respuesta correcto. Por otra parte, la precisión de la estimación de la tensión residual en el método comparativo 1 y el método comparativo 2 es menor que la del método propuesto. De esta manera, es posible mejorar la precisión de la estimación de la tensión residual estableciendo la posición y el tamaño del rango de análisis utilizando los resultados del análisis del proceso de análisis teórico.

## (2) Prueba 2

En el método propuesto, el punto de medición se estableció en la región de generación de tensión que se muestra en los resultados del análisis mediante el proceso de análisis teórico. En el caso de que haya más puntos de medición que el método propuesto (en lo sucesivo denominado "método comparativo 3"), la tensión residual fue estimado y comparado con los resultados del método propuesto. La figura 13A es una vista que ilustra un punto de medición en un método propuesto, y la figura 13B es una vista que ilustra un punto de medición en el método comparativo 3. En los dibujos, el punto de medición se indica mediante cuadrados negros.

Las figuras 14A a 14C son gráficos que muestran los resultados de la Prueba 2. La figura 14A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial de filete, La figura 14B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial del pasador, y la figura 14C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección radial del filete. En las figuras 14A a 14C, un eje vertical muestra la magnitud de la tensión residual, y un eje horizontal muestra la profundidad desde la superficie. Adicionalmente, en cada gráfico, la línea continua gris muestra el valor de respuesta correcto, la línea discontinua muestra los resultados del experimento numérico por el método comparativo, y la línea continua negra muestra los resultados del experimento numérico por el método propuesto.

Tanto el método propuesto como el método comparativo 3 han obtenido resultados muy cercanos al valor de respuesta correcto. Al medir la deformación inherente, es necesario recoger la pieza cortada. Por lo tanto, a medida que aumenta el número de puntos de medición, es efectivo para la precisión de la estimación, pero el coste de operación se vuelve enorme. En el método propuesto, se puede encontrar que la precisión de estimación equivalente a la del método comparativo 3 está asegurada mientras se reduce el número de puntos de medición.

## Aplicabilidad industrial

El método de estimación de tensión residual y el dispositivo de estimación de tensión residual de la presente invención son útiles como un método de estimación de tensión residual y un dispositivo de estimación de tensión residual para estimar la tensión residual de una estructura basada en un método de deformación inherente.

## Descripción de números y signos de referencia

- 1: dispositivo de estimación de tensión residual
- 10: ordenador
- 12: unidad de entrada
- 13: unidad de pantalla
- 110: programa de estimación de tensión residual
- 111: CPU
- 115: disco duro
- 116: interfaz de entrada/salida

- 117: interfaz de salida de imagen
- 200: árbol de cigüeñal (estructura)

**REIVINDICACIONES**

1. Un método de estimación de la tensión residual basado en la deformación inherente, que comprende las etapas de:
  - 5 ejecutar un proceso de análisis teórico de una estructura (S1) analizando la tensión generada en la estructura (200) y mostrando los resultados del análisis (S2), sin usar un valor medido de la estructura (200);
  - 10 adquirir, basado en los resultados del análisis, condiciones relativas a un rango de análisis (S3) para estimar la tensión residual, las condiciones adquiridas con respecto al rango de análisis, incluido un punto de medición de una pieza cortada que se recogerá de la estructura (200);
  - 15 cortar la estructura (200), recoger la pieza cortada de una porción de la estructura (200) determinada como el punto de medición, y adquirir un valor medido para la tensión residual de la estructura midiendo la tensión residual en el punto de medición de la pieza cortada (S4);
  - 20 estimar la distribución de la deformación inherente (S8) en el rango de análisis utilizando el valor medido, basado en las condiciones adquiridas con respecto al rango de análisis, para aproximar la deformación inherente de la estructura en el rango de análisis; y
  - 25 calcular los resultados de la estimación de la tensión residual en función de la distribución estimada de la deformación inherente (S10).
  
2. El método de estimación de tensión residual según la reivindicación 1, donde la etapa de adquirir condiciones concernientes al rango de análisis (S3) incluye adquirir una posición y un tamaño del rango de análisis como las condiciones concernientes al rango de análisis, y la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente (S8) incluye estimar la distribución de la deformación inherente en el rango de análisis especificado por la posición y el tamaño adquiridos.
  
3. El método de estimación de tensión residual según la reivindicación 2, donde la etapa de adquirir el valor medido (S4) incluye adquirir la deformación elástica y la tensión residual medida en el punto de medición en el rango de análisis especificado por la posición y el tamaño adquiridos como el valor medido.
  
4. El método de estimación de tensión residual según la reivindicación 1, donde la etapa de adquirir condiciones concernientes al rango de análisis (S3) incluye adquirir información que define una pluralidad de regiones divididas que dividen el rango de análisis como las condiciones concernientes al rango de análisis, y la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente (S8) incluye determinar un parámetro de una función de distribución para aproximar la función de distribución, que es un conjunto de una pluralidad de funciones por partes definidas para cada una de la pluralidad de regiones divididas definidas por la información adquirida, a la distribución de deformación inherente del rango de análisis basado en el valor medido.
  
5. El método de estimación de tensión residual según la reivindicación 4, donde la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente (S8) incluye determinar el parámetro de la función de distribución de modo que cada función por partes se haga continua en un límite de cada región dividida.
  
6. El método de estimación de tensión residual según la reivindicación 4, donde la etapa de estimar la distribución de la deformación inherente (S8) incluye determinar el parámetro de la función de distribución basado en la interpolación de spline para que un gradiente de cada función por partes se haga continuo en un límite de cada región dividida.
  
7. El método de estimación de la tensión residual según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, donde la etapa de mostrar los resultados del análisis (S2) incluye realizar un análisis elastoplástico en un modelo tridimensional que simula la estructura mediante un método de elementos finitos.
  
8. El método de estimación de la tensión residual según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, donde la etapa de mostrar los resultados del análisis (S2) incluye analizar la tensión generado por el procesamiento de la estructura (200) basado en la teoría de contacto de Hertz.
  
9. Un dispositivo de estimación de tensión residual (1) configurado para realizar el método de estimación de tensión residual según la reivindicación 1, comprendiendo el dispositivo de estimación de tensión residual (1):
  - 60 una unidad de análisis configurada para analizar la tensión generada en la estructura (200), sin usar un valor medido de la estructura (200);
  - 65 una unidad de visualización (13) configurada para mostrar los resultados del análisis por la unidad de análisis;
  - una unidad de entrada (12) configurada para recibir una entrada de las condiciones relativas al rango de análisis para estimar la tensión residual y el valor medido para la tensión residual de la estructura (200);
  - una unidad de estimación (11) configurada para estimar la distribución de la deformación inherente en el rango de análisis utilizando el valor medido, basado en las condiciones relativas al rango de análisis recibido por la unidad de entrada (12), para aproximar la deformación inherente de la estructura (200) en el rango de análisis;
  - estando la unidad de estimación (11) también configurada para calcular los valores de estimación de la tensión

residual basándose en la distribución estimada de la deformación inherente; y una unidad de visualización (13) configurada para mostrar los resultados de la estimación de la tensión residual en función de la distribución de la deformación inherente estimada por la unidad de estimación (11).

FIG. 1

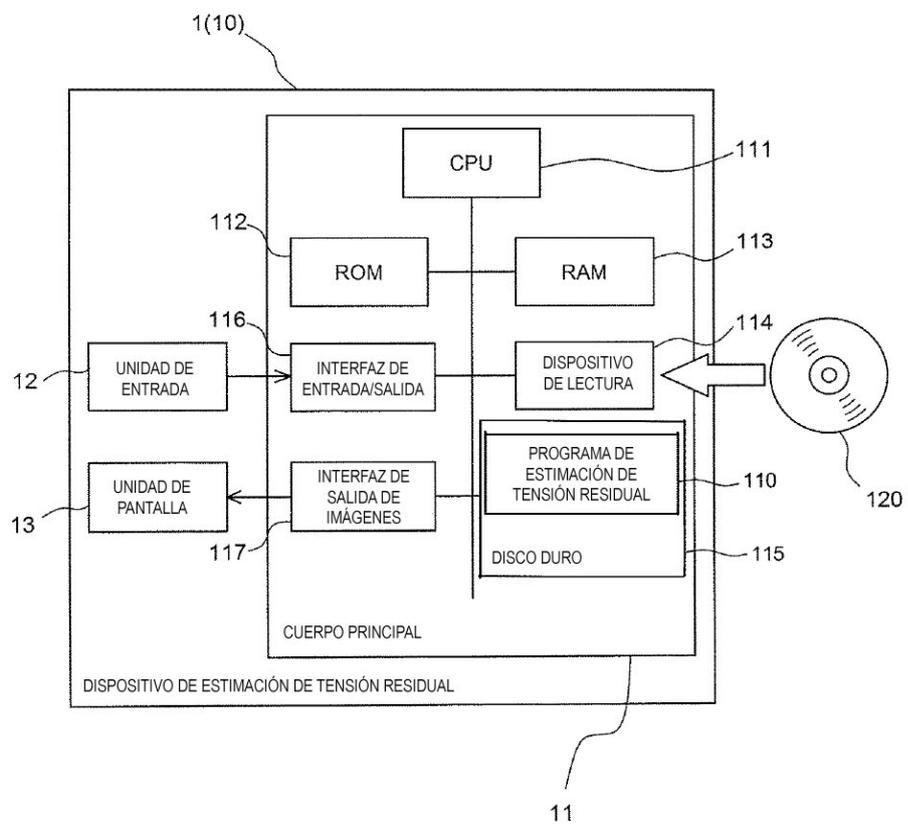


FIG. 2

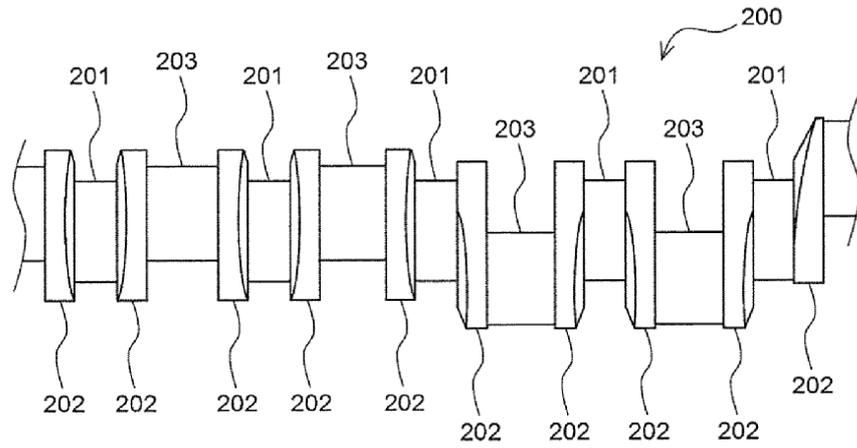


FIG. 3

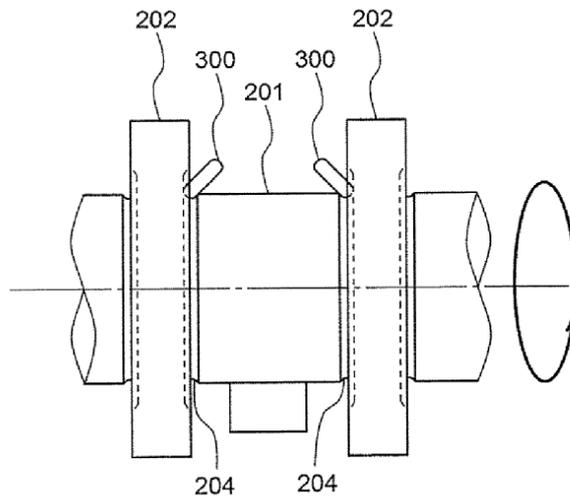
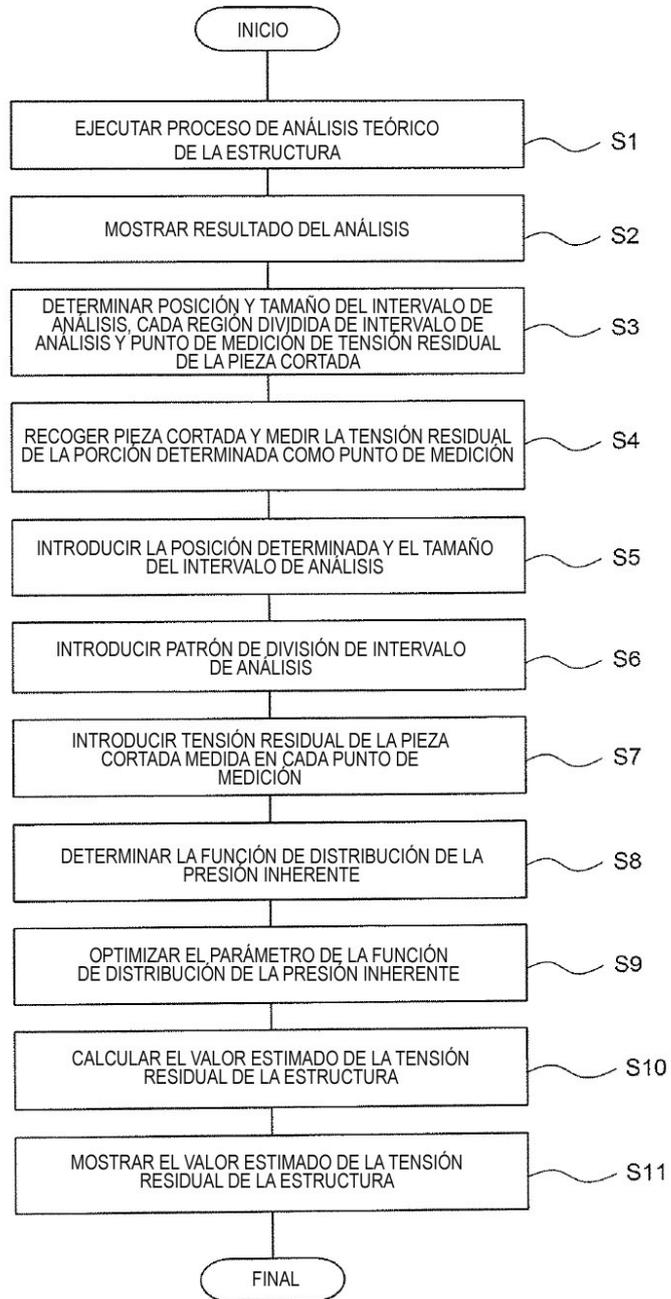
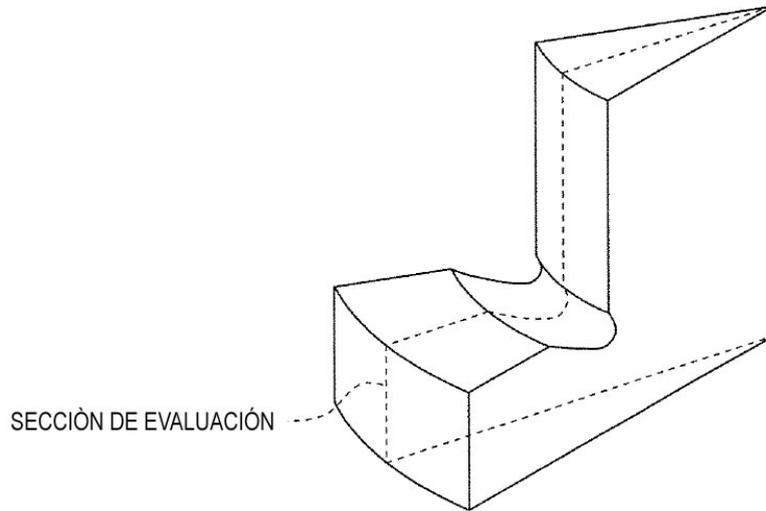


FIG. 4



*FIG. 5A*



*FIG. 5B*

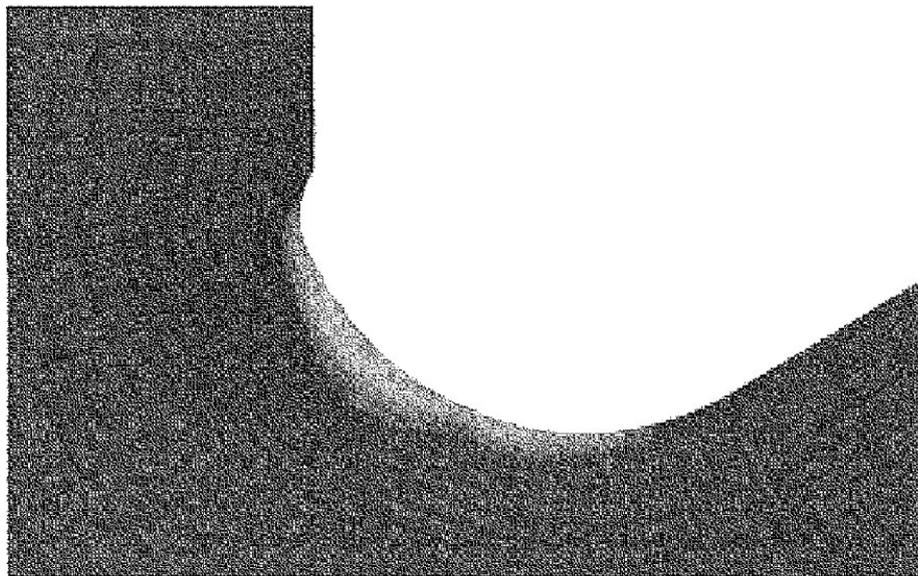


FIG. 6

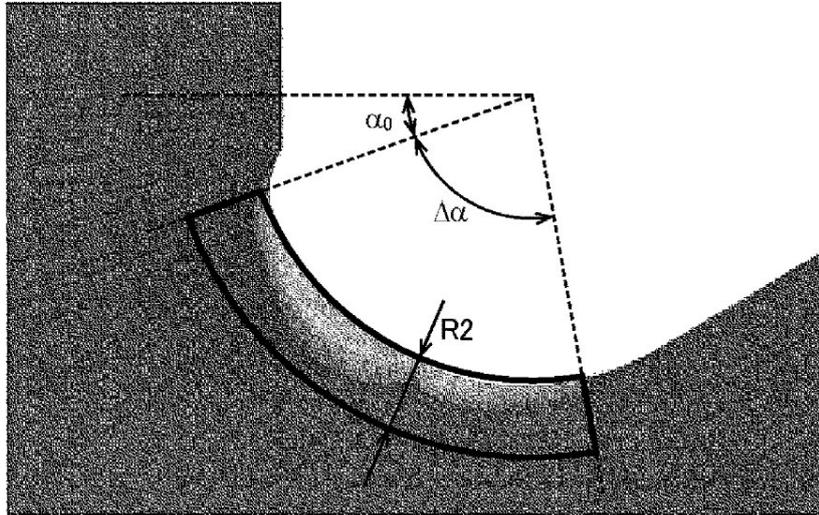
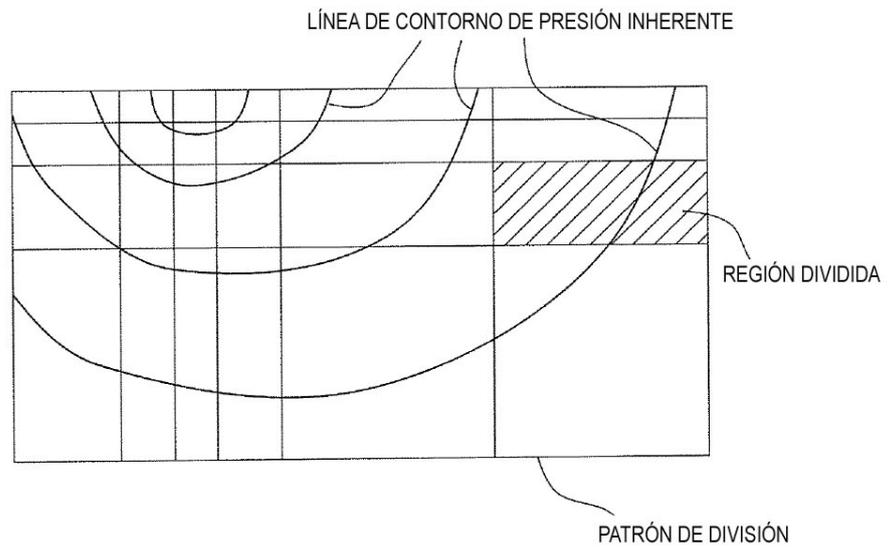


FIG. 7



*FIG. 8*

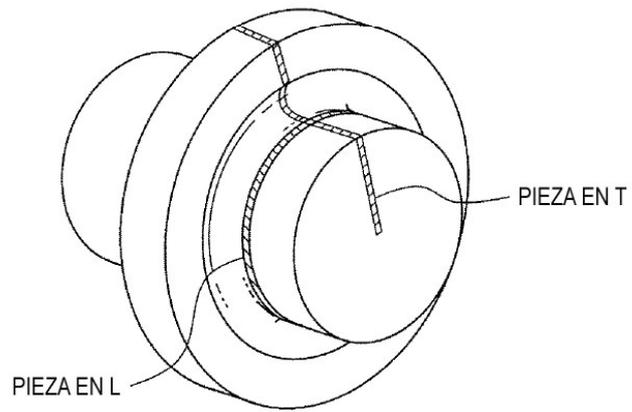


FIG. 9

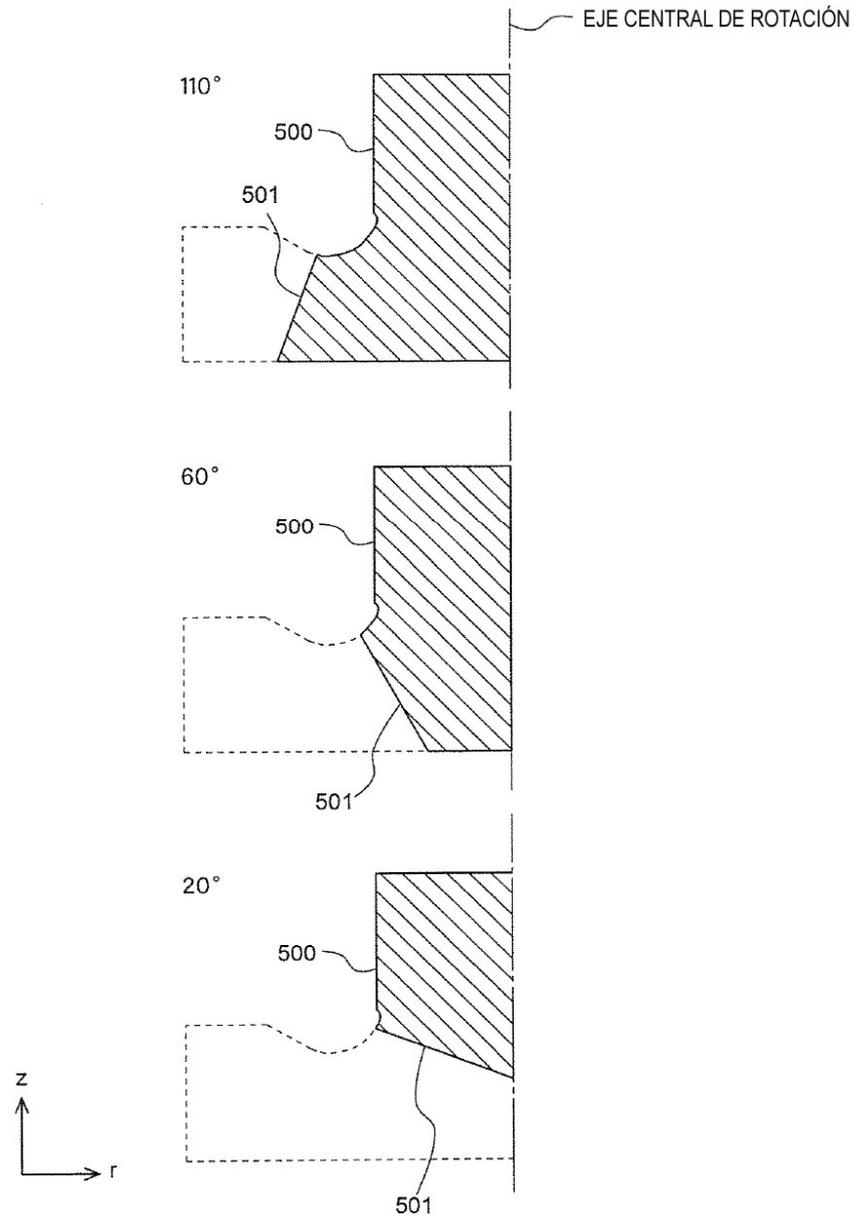


FIG. 10

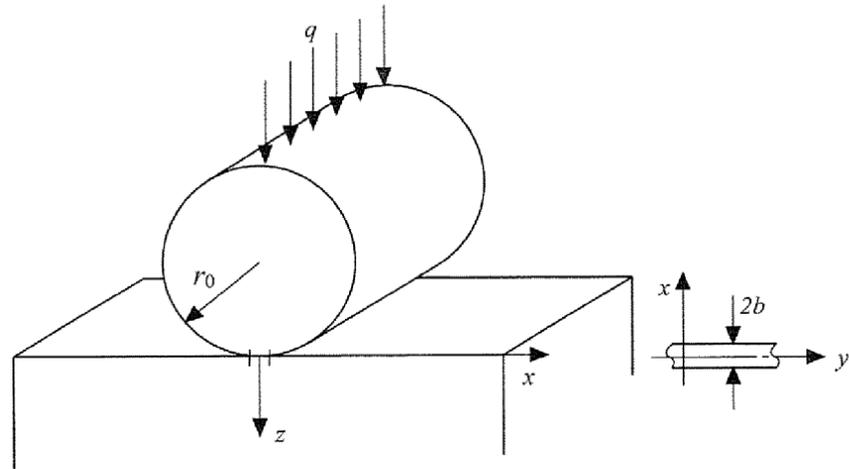


FIG. 11

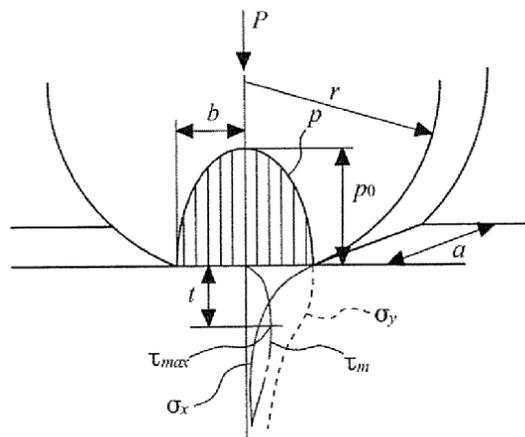


FIG. 12A

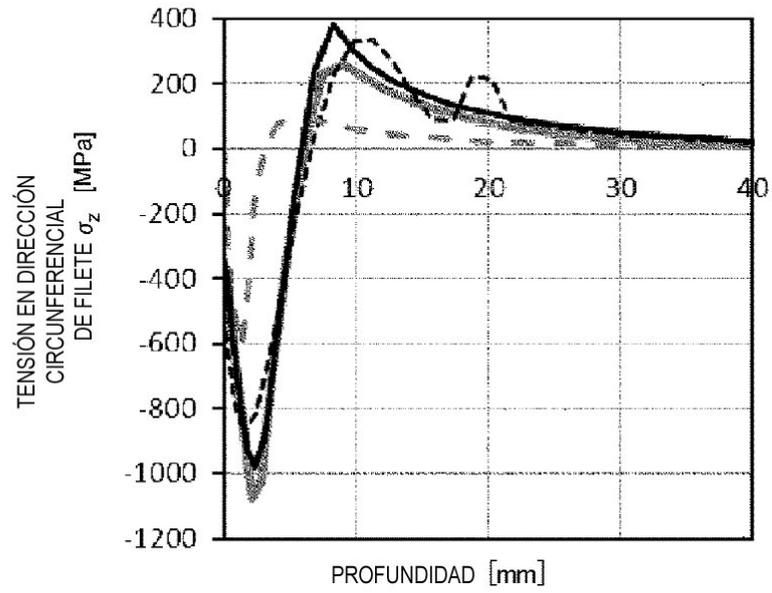


FIG. 12B

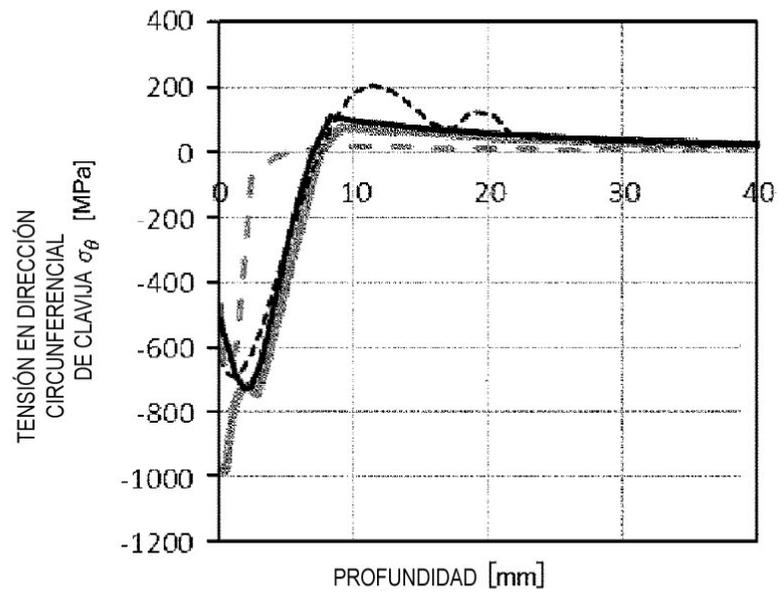


FIG. 12C

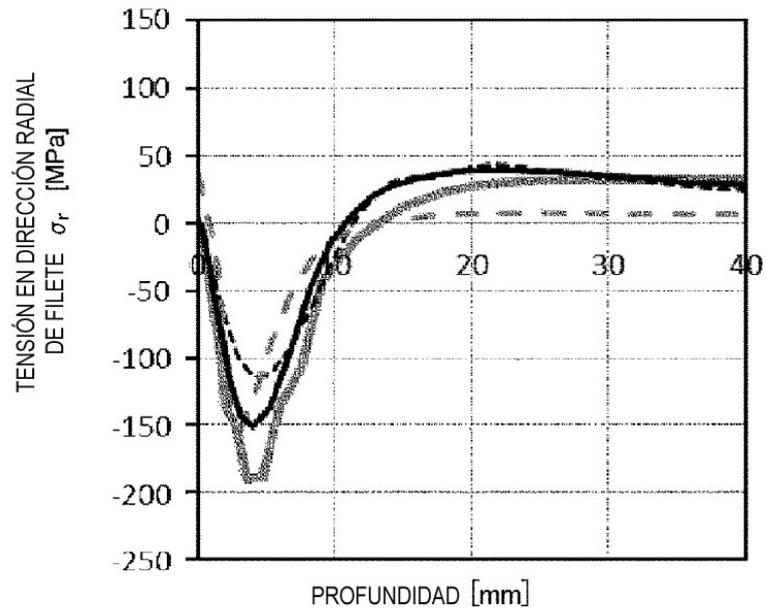
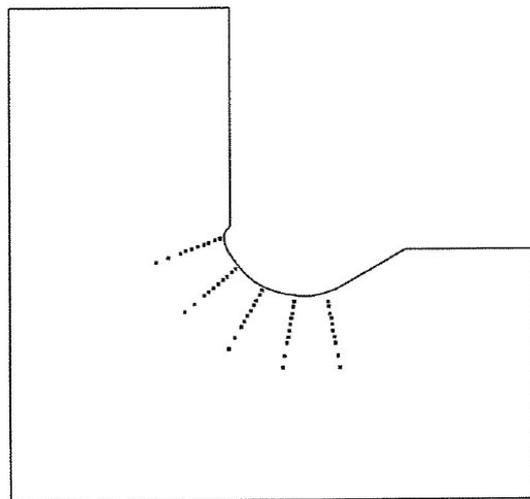
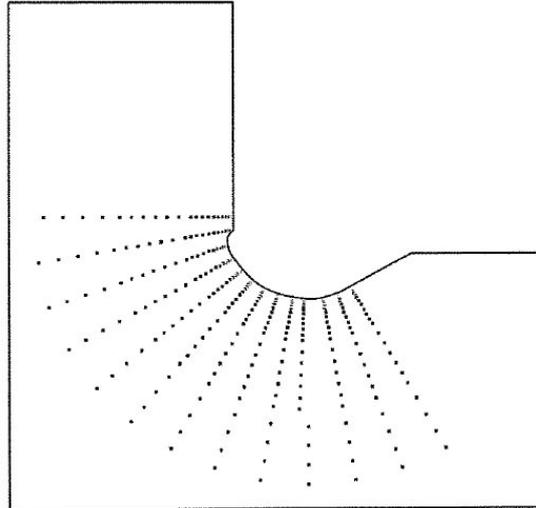


FIG. 13A



*FIG. 13B*



*FIG. 14A*

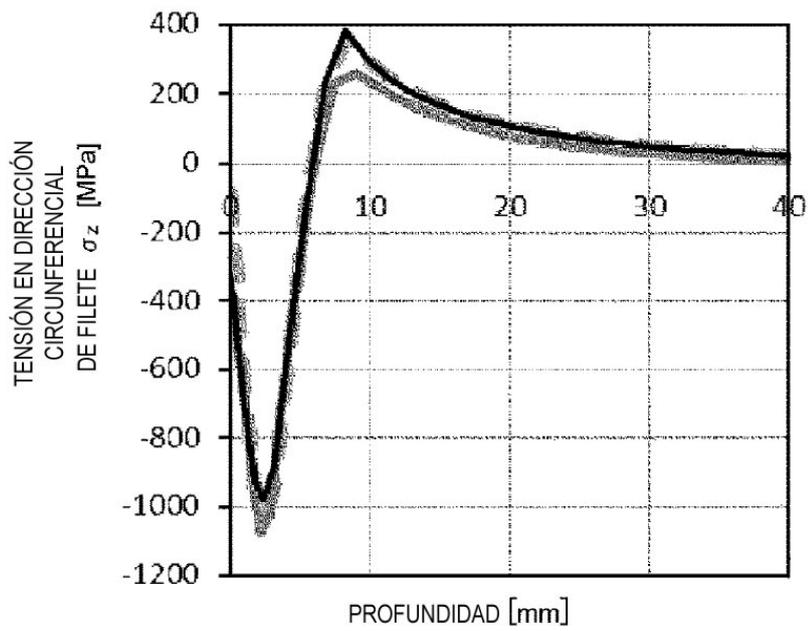


FIG. 14B

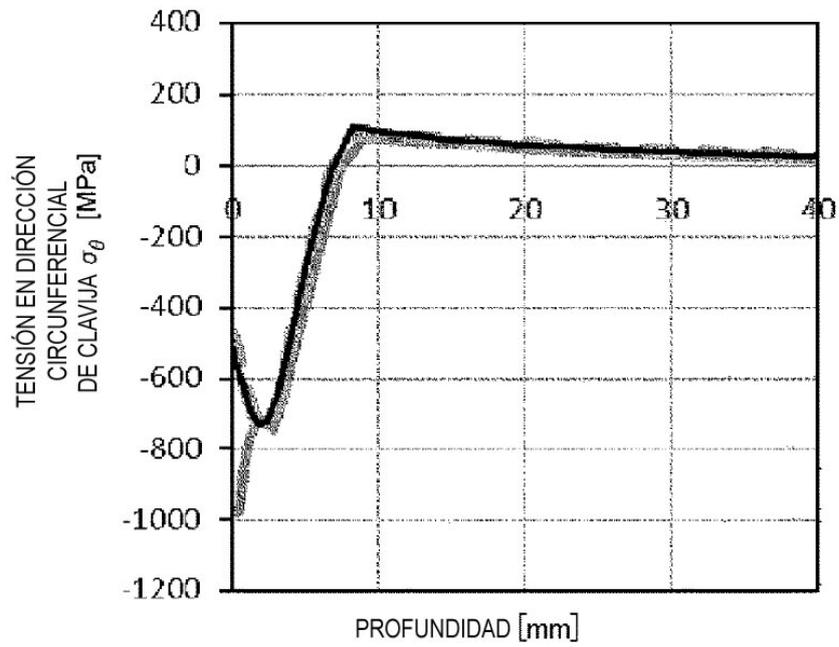


FIG. 14C

