

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 726 273**

51 Int. Cl.:

**G01N 3/20** (2006.01)

**G01N 3/28** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.09.2015** E 15187129 (0)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.01.2019** EP 3147643

54 Título: **Método y producto de programa informático**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**03.10.2019**

73 Titular/es:

**SSAB TECHNOLOGY AB (100.0%)**  
**P.O. Box 70**  
**101 21 Stockholm, SE**

72 Inventor/es:

**TROIVE, LARS**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 726 273 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 producto de programa informático

**Campo técnico**

5 La invención presente se refiere a un método para caracterizar un material metálico, dicho método puede ser usado para determinar la respuesta real del material metálico durante la flexión. La invención presente se refiere además a un producto informático que comprende un programa informático que contiene medios de código de programa informático dispuestos para causar que un ordenador o un procesador ejecute el paso de cálculo de un método según la invención presente.

**Antecedentes de la invención**

10 En años recientes ha existido un interés creciente por el uso de aceros de resistencia ultraalta (UHS), es decir, aceros con un límite de deformación  $\geq 550$  MPa o una resistencia a la tracción  $\geq 780$  MPa, en diversas industrias, tales como la industria automovilística, la aeroespacial y las industrias de la construcción. El uso de dicho material da lugar a mejoras considerables del rendimiento de los productos que incorporan dicho material y a una reducción de su peso. Sin embargo, es bien sabido que conforme aumenta la resistencia de un acero, su flexibilidad tiende a disminuir. Por  
15 tanto, existe la necesidad de investigar y mejorar la flexibilidad de los aceros de alta resistencia para satisfacer las crecientes demandas del mercado.

La flexibilidad de los materiales metálicos se determina usualmente realizando ensayos de flexión convencionales combinados con ensayos de tracción. Sin embargo, el comportamiento de un material en un ensayo de tracción en el que se aplica una tensión uniforme a través del espesor de una muestra de ensayo es diferente del comportamiento  
20 que exhibe ese material cuando es flexionado. Se ha encontrado que el ensayo de tracción no proporciona información precisa sobre el comportamiento de flexión de un material, es decir, la respuesta real de un material durante la flexión.

El Verband der Automobilindustrie (VDA) 238-100: 2010 Plate Bending Ensayo for Metallic Materials (de ahora en adelante, la "norma VDA 238-100") es el procedimiento de ensayo de la norma que es usado comúnmente para determinar la flexibilidad de los materiales metálicos, especialmente acero laminado en frío. Los ángulos de flexión  
25 son determinados usando un dispositivo de flexión de tres puntos según el procedimiento descrito en la norma VDA 238-100, que especifica las condiciones de prueba, las herramientas, la geometría y los ajustes experimentales, así como la evaluación del límite de flexibilidad. La norma VDA 238-100 especifica además un método para calcular el ángulo de flexión. Con el fin de permitir una comparación directa entre metales con diferentes espesores, se usa comúnmente un factor de corrección con grosor igual a la raíz cuadrada del grosor del material.

30 Durante el ensayo de flexión de la norma VDA 238-100, se monitoriza la fuerza requerida para desplazar una cuchilla que causa que flexione una muestra de lámina metálica de ensayo. Esto permite determinar la fuerza de deformación máxima y la longitud del recorrido logrados durante el ensayo de flexión. La longitud del recorrido se puede transponer a un ángulo de flexión correspondiente. El ensayo de las láminas metálicas puede ser realizado en dos direcciones, concretamente, paralela y perpendicular a la dirección de laminación de una lámina metálica.

35 La Figura 1 muestra los datos típicos obtenidos usando un ensayo de la norma VDA 238-100 para medir la posición de la cuchilla o "recorrido del golpe", S (es decir, la distancia que ha recorrido la cuchilla) y la fuerza aplicada, F. Según la norma VDA 238-100, la posición de la cuchilla con la fuerza máxima aplicada,  $F_{max}$ , justo antes de que la fuerza aplicada comience a disminuir, puede ser usada para determinar el ángulo de flexión cuando la muestra de prueba falla.

40 La flexión elástico-plástica es generalmente un proceso estable en el que la curvatura de una muestra de prueba aumenta uniformemente sin plegarse. Se ha encontrado que el ensayo de la norma VDA 238-100 no predice con precisión la respuesta real de un material metálico durante la flexión, ya que muchos materiales metálicos no exhiben este comportamiento elástico-plástico perfecto (es decir, sin endurecimiento) durante la flexión y puede ocurrir un pliegue. Por ejemplo, Z. Marciniak, J.L. Duncan y S.J. Hu describen lo siguiente en su libro titulado "Mechanics of Sheet  
45 Metal Forming", ISBN 0 7506 5300: "Es muy difícil predecir con precisión la característica de curvatura del momento [de un material metálico] [es decir, un momento de la sección transversal, M] a partir de datos de tracción. La característica del momento es extremadamente sensible a las propiedades del material con una deformación muy pequeña y estas propiedades no se determinan con frecuencia con precisión en un ensayo de tensión".

50 Florando y otros, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 53, 2005, pp 619-638 describe un método de flexión de microhaces para estudiar las relaciones de tensión-deformación para películas delgadas de metal sobre sustratos de silicio.

La flexión de tres puntos en miembros huecos es conocida también, por L. Gardner y otros, Journal of Constructional Steel Research, 60, 2004, pp 1319-1332.

55 T. Nakamura y otros, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, Nº 3. Pp 323-339, 1986 describe el uso de un ensayo de flexión de tres puntos para investigar la mecánica de fractura de una muestra dúctil.

El uso de un ensayo de flexión de tres puntos para investigar las propiedades estructurales de los materiales que tienen módulos y resistencias que son diferentes a tensión y compresión se describe en la NASA Technical Note, NASA TN D-7572, de marzo de 1974, de Christos Chamis. Típicamente, tales materiales son resinas estructurales.

5 La patente de los E.E.U.U. US2008/0216585 describe un dispositivo de prueba que puede aplicar un momento constante a un material durante la flexión.

**Compendio de la invención**

10 Un objetivo de la invención es proporcionar un método para caracterizar un material metálico, con el que el método puede ser usado para determinar una respuesta real de un material metálico durante la flexión, es decir, para predecir con mayor precisión la respuesta de un material metálico durante la flexión que con las predicciones basadas en los datos obtenidos mediante ensayos de flexión (como el ensayo de la norma VDA 238-100) en el que se usa la fuerza máxima aplicada para predecir la respuesta real de un material metálico durante la flexión.

Este objetivo se consigue mediante un método de caracterización de un material metálico que comprende los pasos de:

- 15 a. proporcionar una placa de material metálico soportada simplemente entre dos rodillos paralelos, dichos rodillos tienen el mismo diámetro;
- b. flexionar la placa proporcionando una fuerza exterior, F, por medio de una cuchilla de flexión, dicha fuerza actúa en un plano perpendicular al plano formado por los centros de los rodillos e interseca la placa en la línea central entre los rodillos, dicha cuchilla de flexión se extiende al menos por toda la longitud de la placa;
- 20 c. el método se caracteriza por comprender el paso de calcular un momento de la sección transversal, M, del material metálico mediante la ecuación siguiente:

$$M = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)}$$

donde F es la fuerza de flexión aplicada,

$L_m(\beta_1)$  es el brazo del momento, calculado según la ecuación siguiente:

$$L_m(\beta_1) = L_0 - (R_k + R_d) \cdot \text{sen}(\beta_1)$$

25 donde:

$L_0$  es la mitad del ancho del troquel,

$R_d$  es el radio del borde del troquel,

$R_k$  es el radio de la cuchilla, y

$\beta_1$  es el ángulo de flexión.

30 El ángulo de flexión,  $\beta_1$ , es el ángulo movido por la superficie normal de la placa en el punto de contacto con uno de los rodillos durante la flexión por la fuerza exterior (es decir,  $90^\circ$  (o  $\pi/2$  radianes) menos el ángulo agudo entre los vectores normales de los planos inicial y flexionado de la placa, el plano de inicio correspondiente al plano formado por las líneas centrales de los dos rodillos paralelos y el plano flexionado correspondiente al plano formado por la línea central de un rodillo y la línea de contacto entre ese rodillo y la placa, cuyo plano contiene la normal a la placa en el punto que hace contacto con el rodillo).

35 Para una placa que inicialmente es horizontal, esto es equivalente al ángulo entre la superficie normal de la placa en el punto de contacto con uno de los rodillos y la vertical.

40 En una realización preferida, este objetivo se consigue mediante un método que comprende los pasos de realizar un ensayo de flexión según la norma VDA 238-100 o un ensayo de flexión libre de fricción similar, es decir, realizar un ensayo de flexión de la placa según se describe en dicha norma usando el equipo de ensayo descrito en dicha norma, las muestras se preparan de la manera descrita en dicha norma, bajo las condiciones de prueba descritas en dicha norma, se usa el procedimiento descrito en dicha norma y se determina un ángulo de flexión,  $\beta_1$  (igual a la mitad del ángulo de flexión  $\alpha$  de la norma VDA 238-100), desde el recorrido del golpe según se describe en la norma. El método comprende además el paso de calcular un momento de la sección transversal, M, del material metálico mediante la

45 ecuación siguiente:

$$M = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)}$$

donde F es la fuerza de flexión aplicada,

$L_m(\beta_1)$  es el momento del brazo, y

$\beta_1$  es el ángulo de flexión.

5 Este momento de la sección transversal calculado, M, puede ser usado a continuación para predecir la respuesta real del material metálico.

Al calcular el momento de la sección transversal del material metálico (en lugar de la fuerza aplicada que es determinada usualmente mediante ensayos como el ensayo de la norma VDA 238-100), la tensión del flujo,  $\sigma_1$ , (es decir, el perfil aproximado del perfil de esfuerzos de la sección transversal del material metálico flexionado) puede, por tanto, ser determinada, usando la ecuación siguiente:

$$10 \quad \sigma_1 = \frac{2}{B \cdot t^2 \cdot \varepsilon_1} \cdot \frac{d}{d\varepsilon_1} (M \cdot \varepsilon_1^2)$$

donde la deformación principal,  $\varepsilon_1$  se calcula a partir de:

$$\varepsilon_1 = \beta_2 \cdot \frac{t}{L_m(\beta_1)}$$

15 donde B es la longitud de la flexión (es decir, la longitud de la placa en la dimensión que se extiende paralela a los soportes del troquel), t es el espesor de la muestra en mm, (véanse las Figuras 3a y 3b).  $\beta_2$  es el ángulo real (en grados) al que es flexionado dicho material metálico.

Según se usa en esta memoria, el ancho, L, de la placa es la dimensión que se extiende a través de la abertura del troquel (es decir, entre el par de soportes del troquel paralelos), la longitud, B, de la placa es la dimensión que se extiende paralela a los soportes del troquel, mientras que el grosor, t, de la placa es la dimensión que se extiende en la dirección recorrida por la cuchilla durante la flexión. Por tanto, al decir "cuchilla de flexión que se extiende al menos a lo largo de toda la placa" se entiende que la cuchilla de flexión es capaz de ejercer la fuerza a través de toda la placa, de manera que se forma una flexión uniforme sin ninguna deformación.

20 Por "soportes del troquel" se entiende los bordes del troquel que están en contacto con la placa metálica. En la invención presente, los soportes del troquel son los bordes exteriores del rodillo (es decir, cilindros que giran libremente alrededor de un eje). Los dos soportes del troquel son paralelos para garantizar una distancia uniforme a través de la abertura del troquel.

El método según la invención presente permite que todas las partes de la respuesta de un material metálico a la flexión sean determinadas a lo largo de todo su grosor desde su superficie exterior hasta su centro usando solo un ensayo de flexión simple (en lugar de usar, por ejemplo, el ensayo de la norma VDA 238-100 y determinar solamente la fuerza máxima aplicada).

30 El método según la invención presente puede ser usado además para indicar cuando un material metálico exhibe sectores con deformación plástica. El pliegue se puede predecir también usando el método según la invención presente.

35 La invención presente se basa en la idea de que los ensayos de la norma, como la norma VDA 238-100, no predicen con precisión la respuesta real de un material metálico a la flexión. Los experimentos realizados por el inventor usando el ensayo de la norma VDA 238-100 han incluido casos en los que no se ha producido ningún fallo de los materiales metálicos, incluso cuando se ha excedido la fuerza de flexión máxima determinada por el ensayo de la norma VDA 238-100. El inventor ha encontrado que la fuerza de flexión aplicada en el ensayo de la norma VDA 238-100 alcanza siempre un nivel máximo y luego disminuye, debido a la disminución de la velocidad angular de la flexión (esto puede ser demostrado teóricamente). La determinación del momento de la sección transversal, M, (y no la fuerza de flexión aplicada) proporciona por tanto una predicción más precisa de la respuesta real de un material metálico a la flexión.

40 Además, usando la metodología de la invención, la posición angular cuando se produce la fuerza natural máxima puede ser determinada minimizando la fórmula de la fuerza de la invención.

$$\frac{dF}{d\beta_1} = 0$$

Así, suponiendo un momento constante, M, cuando la sección transversal está completamente plástica, entonces;

$$\beta_{F_{max}} = \text{sen}^{-1} \left[ \frac{L_0 - \sqrt{L_0^2 - (R_d + R_k)^2}}{(R_d + R_k)} \right] \times \frac{180}{\pi}$$

donde  $L_0$  = mitad del ancho del troquel (es decir, la mitad de la distancia entre los centros de los rodillos),  $R_d$  = el radio del rodillo,  $R_k$  = el radio de la cuchilla, y  $\beta_{F_{max}}$  es el ángulo de flexión a  $F_{max}$ .

Entonces  $F_{max}$  se convierte en;

$$F_{Max} = \frac{4 \cdot M_{max}}{(R_d + R_k)} \cdot \text{sen } \beta_{F_{max}} =$$

$$= \frac{4 \cdot M_{max}}{(R_d + R_k)^2} \cdot \left( L_0 - \sqrt{L_0^2 - (R_d + R_k)^2} \right)$$

5

El momento máximo de flexión se puede estimar como;

$$M_{Max} = \frac{B \cdot t^2 \cdot (R_m \cdot \frac{2}{\sqrt{3}})}{4}$$

donde; B = longitud de la flexión (es decir, longitud de la muestra que se está flexionando, (véase la Figura 3b); t = espesor y  $R_m$  = resistencia final.

10 Suponiendo que una condición del momento de la sección transversal es constante, el inventor ha demostrado que la posición del ángulo para el máximo de F natural solo depende de la geometría del aparato de prueba. Sin embargo, si el material muestra un comportamiento de endurecimiento del momento, la carga máxima natural aparece un poco más tarde.

15 Usando los métodos de la invención, un operador puede ser informado de cuándo un material sobrepasa la fuerza natural máxima durante el ensayo de flexión. En algunos casos, es decir, para acero dulce hasta el nivel de aproximadamente 800 MPa de resistencia, este máximo de fuerza natural puede ser alcanzado antes de un fallo aparente del material durante el ensayo de flexión (es decir, la fuerza aplicada cae durante el ensayo de flexión), mostrando la utilidad de la invención en la determinación de las propiedades de flexión de materiales que de otra manera no pueden conocerse usando metodologías de la norma. El fallo de metodologías como el ensayo de la norma  
20 VDA 238-100 para determinar la fuerza máxima surge debido a la no linealidad de la fuerza aplicada y al ángulo de flexión, que es compensado usando la metodología de la invención presente.

Debe tenerse en cuenta que el método según la invención presente no pretende reemplazar los ensayos de normas tales como la norma VDA 238-100, sino complementarlas. Es necesario además realizar ensayos convencionales de flexión por aire para determinar la flexibilidad límite recomendada de un material metálico en términos de la relación  
25 entre el radio de la cuchilla y el espesor del material metálico, es decir, la relación R/t. Sin embargo, existe también la necesidad de un método complementario, tal como el método según la invención presente, que permite investigar el comportamiento de un material metálico durante la flexión en conexión con su microestructura. El método según la invención presente, concretamente, permite detectar y analizar la falta de homogeneidad dentro de un material metálico.

30 Según una realización de la invención, el método comprende el paso de estimar el módulo de Young, E, de un material metálico trazando un gráfico de  $\beta_2$  y del momento de la sección transversal calculada, M y determinar el gradiente de la parte elástica de la curva del momento, donde el gradiente es:

$$\frac{2 \cdot E' \cdot I}{L_m}$$

donde I es el momento de inercia y donde E' es el módulo de Young en una deformación simple y está dado por:

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

35

donde  $\nu$  es la relación de Poisson.

Para el acero, esto se puede expresar como:

$$E' \approx \frac{E}{(1 - 0.3^2)}$$

5 Según una realización de la invención, el momento de la sección transversal calculado, M, o la tensión del flujo calculada,  $\sigma_1$ , o el módulo de Young estimado, E, o la relación M/M<sub>e</sub>, son usados para optimizar un producto que comprende el material metálico, es decir, el momento de la sección transversal calculado, M, o la tensión del flujo calculada  $\sigma_1$ , o el módulo de Young estimado, E, o la relación M/M<sub>e</sub>, se usa para determinar cómo se debe dimensionar un producto que utiliza el material metálico, construido y/o diseñado para soportar una fuerza de flexión particular, por lo que se puede determinar su idoneidad para una aplicación particular.

10 Según una realización de la invención, el material metálico puede ser un material metálico laminado en frío o laminado en caliente, tal como acero laminado en frío o acero laminado en caliente. El material metálico puede ser acero (tal como acero de alta resistencia o acero de resistencia ultraalta), una aleación de aluminio o magnesio, o comprender cualquier otro metal o aleación metálica.

Según se usa en esta memoria, "acero de alta resistencia" tiene un límite de deformación de 250 a 550 MPa, mientras que "acero de resistencia ultraalta" tiene un límite de deformación  $\geq 550$  MPa.

15 Según se usa en esta memoria, la resistencia a la tracción se mide usando las normas ISO 6892-1 o EN 10002-1, preferiblemente la norma ISO 6892-1.

Las características del momento obtenidas para diferentes materiales, usando la fórmula de la invención, se pueden superponer además, simulando el comportamiento de la sección transversal de materiales con múltiples capas.

20 Según una realización de la invención, el método comprende el paso de obtener la característica del momento del material metálico, es decir, el momento de la sección transversal, M, del material metálico, y usarla para estimar la recuperación del resorte del material metálico para una opción libre de configuración de flexión, usando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta\beta_{tot} = \beta_{C\ el} + \beta_{S\ el} + \Delta\beta_{12}$$

$$\beta_{C\ el} = \frac{M_L \cdot L_C}{E'I} = \frac{M_L \cdot \left(R_k + \frac{t}{2}\right) \cdot \beta_C}{2 E'I}$$

$$\beta_{S\ el} = \frac{M_L \cdot L_S}{2 E'I} = \frac{M_L}{2 E'I} \cdot \frac{L_N}{\cos(\beta_1)}$$

$$\beta_C = \beta_2 - \frac{2}{M} \int \beta_2 dM$$

$$\Delta\beta_{12} = \beta_1 - \beta_2 = \int_0^{\beta_1} \frac{t \cdot \text{sen } \beta_1}{L_m(\beta_1)}$$

$$M_L = M \frac{L_m}{L_N}$$

la longitud aproximada de la pestaña en el estado de descarga es:

$$\frac{L_N}{\cos(\beta_1)}$$

25 y la mitad de la longitud del material metálico en contacto con la cuchilla es:

$$\left(R_k + \frac{t}{2}\right) \cdot \beta_C$$

donde:

30  $\Delta\beta_{tot}$  es la cantidad total de recuperación,  $\beta_{set}$  es la recuperación de la pestaña,  $\beta_{Cel}$  es la recuperación respecto al material en contacto con la cuchilla, M<sub>L</sub> es el momento reducido debido a la limitación de curvatura debida al radio de la cuchilla, L<sub>N</sub> es el brazo del momento (distancia horizontal entre los puntos de contacto tangenciales considerando una pestaña curvada), L<sub>S</sub> es la longitud estimada de la pestaña, L<sub>C</sub> es la longitud del material formado por la cuchilla, R<sub>K</sub> es el radio de la cuchilla y  $\beta_C$  es el ángulo de contacto entre el material y la cuchilla y  $\beta_1$  es el ángulo de flexión.

Según otra realización de la invención, el método comprende el paso de obtener el momento de la sección transversal, M del material metálico y usarlo para estimar un coeficiente de fricción  $\mu$ , del material metálico usando la ecuación:

$$\mu = \left[ \frac{M - M_{mtrl}}{M_{mtrl}} \right] \cdot \frac{1}{\tan \beta_1}$$

donde  $M_{mtrl}$  son las características del momento de la sección transversal obtenidas para un material, usando un equipo de ensayo de flexión libre de fricción.

5 La invención presente se refiere también a un producto informático que comprende un programa informático que contiene medios de código de programa informático dispuestos para causar que un ordenador o al menos un procesador ejecute el paso de cálculo de un método según una realización de la invención presente, almacenado en un medio legible por el ordenador o una onda portadora, es decir, mediante el cual el producto informático puede ser usado para calcular el momento de la sección transversal,  $M$ , y/o cualquiera de las otras propiedades del material metálico descrito en esta memoria.

10 **Descripción breve de los dibujos**

La invención presente es explicada a continuación con más detalle por medio de ejemplos no limitadores haciendo referencia a las Figuras adjuntas en las que:

La Figura 1 muestra un diagrama usado para determinar la flexibilidad de un material metálico usando el ensayo de la norma VDA 238-100 según la técnica anterior.

15 La Figura 2 muestra los pasos de un método según una realización de la invención presente,

La Figura 3a muestra esquemáticamente las fuerzas y el momento que actúan sobre un material metálico durante la flexión con un método según una realización de la invención.

La Figura 3b muestra esquemáticamente la disposición de la muestra, los rodillos y la cuchilla de flexión, y las variables usadas para describir las diversas dimensiones a las que se hace referencia en esta memoria.

20 La Figura 4 muestra una curva de la fuerza convencional del ensayo de la norma VDA 238-100,

La Figura 5 muestra una curva del momento convencional calculado usando la fórmula convencional para el momento,

La Figura 6 muestra el ángulo de contacto  $\beta_c$  en la cuchilla que surge cuando la pestaña se curva durante el ensayo de flexión.

25 La Figura 7 muestra la curva del momento,  $M_{tot}$ , calculada usando el momento de la sección transversal calculado según la invención presente,

La Figura 8 muestra los datos de prueba de tracción obtenidos en los ensayos sobre Domex 700™,

La Figura 9 muestra una comparación entre la fuerza de flexión calculada basada en los datos del ensayo de tracción Domex 700™ y tres ensayos de flexión realizados con el mismo material con diferentes longitudes del recorrido,

La Figura 10 ilustra esquemáticamente una bobina de material metálico,

30 La Figura 11 muestra el momento teórico de la sección transversal elástica y el momento máximo de la sección transversal en la flexión,

La Figura 12 muestra la fuerza contra la posición de la cuchilla medida en la flexión,

La Figura 13 muestra el momento de la sección transversal calculada según la invención presente,

La Figura 14 muestra el momento adimensional calculado  $M/M_e$ ,

35 La Figura 15 muestra la tensión del flujo obtenida usando el momento de la sección transversal calculado según la invención presente,

La Figura 16 muestra una estimación del módulo de Young obtenido usando un método según la invención presente.

La Figura 17 muestra una comparación de la relación de los valores  $M/M_e$  obtenidos de los ensayos de tracción y de los ensayos de flexión.

40 La Figura 18 muestra los pasos del método para estimar la recuperación para una elección libre de la configuración geométrica,

La Figura 19 muestra el principio para la estimación de la forma de curvatura de un material,

La Figura 20 muestra la distribución de energía dentro de una flexión,

La Figura 21 muestra los cambios de los ángulos de contacto y forma  $\beta_C$  y  $\beta_S$  respectivamente durante la flexión,

La Figura 22 muestra la fuerza en función del desplazamiento calculado usando un método según la invención presente, y comparaciones con los ensayos realizados.

5 La Figura 23 muestra los vectores de fuerza que representan la carga de flexión y la fuerza de fricción durante un ensayo de flexión.

La Figura 24 muestra el momento en función del ángulo de flexión para un intervalo de aceros de alta resistencia de 6 mm de espesor sometidos a flexión con diferentes niveles de fricción involucrados,

La Figura 25 muestra la fuerza contra al desplazamiento para un intervalo de aceros de alta resistencia de 6 mm de espesor sometidos a flexión con diferentes niveles de fricción involucrados,

10 La Figura 26 muestra una comparación entre la fuerza medida experimentalmente y la fuerza calculada usando los métodos de la invención.

La Figura 27 muestra una comparación entre la fuerza medida experimentalmente y el ángulo calculado a  $F_{max}$ , dependiendo de la geometría de la configuración de flexión,

15 La Figura 28 muestra las características del momento de los materiales de base usados para formar el compuesto en el Ejemplo 5,

La Figura 29 muestra las curvas del momento para las diversas capas de la estructura compuesta del ejemplo 5, y

La Figura 30 muestra la curva del momento libre de unidades predicha de la estructura compuesta del ejemplo 5, en comparación con la curva real de un grosor equivalente del material de base DX960.

#### **Descripción detallada de realizaciones**

20 En esta memoria se usan las siguientes abreviaturas:

$M$  = Momento de corte transversal (flexión)

$M_{Max}$  = Momento de flexión máximo

$M_L$  = Momento reducido debido a la limitación de la curvatura debida al radio de la cuchilla

25  $M_{mtrl}$  = Características del momento de la sección transversal obtenidas usando un equipo de ensayo de flexión libre de fricción

$M_1$  = Componente del momento del corte transversal  $M$

$M_2$  = Componente del momento del corte transversal  $M$

$M_{IOT}$  =  $M_1 + M_2$

$M_e$  = Momento elástico del corte transversal.

30  $F$  = Fuerza aplicada

$F_{max}$  = Fuerza máxima aplicada

$S$  = Distancia vertical a lo largo de la que se ha desplazado la cuchilla de flexión

$S_X$  = Movimiento horizontal del punto de contacto en la cuchilla.

35  $S_Y$  = Movimiento vertical total del punto de contacto, teniendo en cuenta que se mueve hacia arriba a lo largo de la superficie de la cuchilla

$B$  = Longitud de la muestra (longitud de la flexión, o la longitud de la muestra en la dimensión paralela a los rodillos)

$t$  = Espesor de la muestra

$\beta_1$  = Ángulo de flexión

40  $\beta_2$  = Ángulo real al que la placa es flexionada

$\Delta\beta_{12}$  = Diferencia entre  $\beta_1$ , y  $\beta_2$

- $\beta_C =$  Ángulo de contacto entre el material metálico y la cuchilla
- $\Delta\beta_{tot} =$  Cantidad total de recuperación
- $\beta_{Set} =$  Recuperación de la pestaña
- $\beta_{Cel} =$  Recuperación respecto al material en contacto con la cuchilla.
- 5  $\beta_{Fmax} =$  Ángulo de flexión a Fmax
- $L_0 =$  Mitad del ancho del troquel (es decir, la mitad de la distancia entre el punto central de los rodillos)
- $L_m(\beta_1) =$  Brazo del momento al ángulo  $\beta_1$  (distancia horizontal entre los puntos de contacto tangencial)
- 10  $L_N(\beta_1, \beta_C) =$  Brazo del momento (distancia horizontal entre los puntos de contacto reales en la cuchilla y el radio del troquel, es decir, la distancia entre donde la cuchilla y el troquel entran en contacto con la placa que está siendo flexionada)
- $L_S =$  Longitud estimada de la pestaña en contacto con la cuchilla y el troquel
- $L_C =$  Longitud del material formado por la cuchilla.
- $R_d =$  Radio del rodillo
- $R_k =$  Radio de la cuchilla
- 15  $R_m =$  Fuerza final
- $\sigma_1 =$  Tensión del flujo (esfuerzo simple)
- $\bar{\sigma} =$  Esfuerzo efectivo
- $\epsilon_1 =$  Deformación principal (deformación simple)
- $\bar{\epsilon} =$  Deformación efectiva
- 20  $E =$  Módulo de Young
- $E' =$  Módulo de Young con deformación simple
- $I =$  Momento de inercia
- $\mu =$  Coeficiente de fricción del material metálico.
- $\mu_d =$  Fricción entre el material metálico y el radio del rodillo.
- 25  $\nu =$  Relación de Poisson

30 "Simplemente apoyado" significa que cada extremo de la placa puede girar libremente, por tanto, cada soporte de extremo no tiene momento de flexión. Esto se consigue apoyando la placa sobre rodillos paralelos, de manera que el momento creado por la cuchilla cuando es aplicada la fuerza exterior se equilibra con el momento creado a lo largo de la línea central donde se realiza la flexión, y no se produce ninguna flexión adicional o disipación de fuerza en el punto de contacto entre la placa y los rodillos.

35 Típicamente, la placa está sustancialmente en posición horizontal cuando está dispuesta sobre los rodillos. "Sustancialmente horizontal" significa que la placa no se mueve debido a la gravedad cuando está equilibrada sobre los rodillos antes de la flexión. En la práctica, la placa está típicamente en posición horizontal, aunque resultará evidente para las personas expertas en la materia que se pueden usar también variaciones muy pequeñas de la horizontal, siempre que la fuerza aplicada por la cuchilla de flexión esté en un plano perpendicular al plano formado por los centros de los rodillos e interseca la placa a lo largo de toda la línea central entre los rodillos. En otras palabras, si la placa está, por ejemplo, a 2 grados de la horizontal cuando comienza el ensayo, la cuchilla de flexión se mueve (y, en consecuencia, aplica la fuerza) en una dirección la misma cantidad (2 grados) de la vertical durante el ensayo, de manera que la fuerza de flexión se aplica perpendicular a la posición inicial de la placa.

40 La fuerza de flexión es aplicada sobre toda la longitud de la placa. Esto asegura que la placa flexione de manera uniforme durante el ensayo y que la fuerza que resiste a la cuchilla se corresponda con el momento de flexión del material metálico, en lugar de las fuerzas interiores que surgen debido a la deformación de la placa. Para asegurar que la fuerza de flexión sea aplicada por toda la longitud de la placa, la longitud de la cuchilla de flexión es generalmente mayor que la longitud de la placa. Típicamente, la cuchilla de flexión se extiende más allá del borde de la placa durante la flexión. Debido a los efectos finales, es decir, no es una condición de deformación simple, la cuchilla

45

no está en contacto con el material cerca de los bordes. Por tanto, la longitud de la muestra debe ser al menos 10 veces el grosor, para garantizar la respuesta principal de la condición de deformación simple.

5 La placa es dispuesta normalmente de manera que las rebabas de corte o las porciones de la superficie de fractura, posiblemente existentes en los bordes, estén situadas en el lado de la cuchilla (es decir, en el lado de la muestra que está bajo compresión durante la flexión).

La Figura 1 muestra un diagrama usado para determinar la flexibilidad de un material metálico usando el ensayo de la norma VDA 238-100 según la técnica anterior, en la que la flexibilidad del material metálico es determinada midiendo la posición de la cuchilla, S, con la fuerza de flexión máxima aplicada,  $F_{max}$ .

10 La Figura 2 muestra los pasos de un método ejemplar según una realización de la invención presente. El método comprende los pasos para realizar un ensayo de flexión de placa según la norma VDA 238-100 y calcular el momento de la sección transversal, M, de dicho material metálico mediante la ecuación siguiente:

$$M = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)}$$

15 donde F es la fuerza de flexión aplicada,  $L_m(\beta_1)$  es el brazo del momento y  $\beta_1$  es el ángulo de flexión. El momento de la sección transversal calculado, M, puede ser usado para predecir una respuesta real del material metálico durante la flexión.

Este método mejorado para caracterizar un material metálico ha sido encontrado al estudiar la expresión del equilibrio de energía:

$$\int F ds = \int 2Md\beta_2 \quad \dots(1)$$

20 Donde F es la fuerza aplicada, S es la posición de la cuchilla, M es el momento de la muestra de prueba de material metálico y  $\beta_2$  es el ángulo de flexión real.

Esta expresión indica que debe haber un equilibrio entre la entrada de energía durante la flexión del aire y la energía absorbida por la muestra de prueba. Se supone que la fricción entre el material y el radio del rodillo,  $\mu_d$ , es despreciable.

25 La Figura 3a muestra las fuerzas y el momento que actúan sobre la muestra de ensayo de material metálico 10 durante la flexión.  $L_m(\beta_1)$  es el brazo del momento que comienza con el valor inicial  $L_0$  (que es la mitad del ancho del troquel) y disminuye durante el golpe. El ángulo de flexión,  $\beta_1$ , es la mitad del ángulo de flexión real.

La Figura 4 muestra un diagrama de fuerza típico de un ensayo de la norma VDA 238-100 que muestra la fuerza aplicada, F y el desplazamiento vertical de la cuchilla, S.

El desplazamiento vertical de la cuchilla, S puede ser expresado geoméricamente en función del ángulo de flexión  $\beta_1$  como:

30 
$$S(\beta_1) = L_0 \cdot \tan(\beta_1) + (R_d + R_k + t) \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos(\beta_1)}\right) \quad \dots(2)$$

Al aplicar la expresión convencional de la bibliografía para calcular el momento de la sección transversal, es decir =  $\frac{FLm(\beta_1)}{2}$ , y también convertir la distancia S al correspondiente ángulo de flexión  $\beta_1$ , entonces la gráfica del momento de la sección transversal, M, en función del ángulo de flexión,  $\beta_1$ , tiene la forma que se muestra en la Figura 5.

35 El inventor ha observado que hay una falta de coincidencia entre la entrada de energía,  $\int Fds$  durante la flexión y el momento interno y su energía,  $\int 2Md\beta_1$ , es decir, si se aplica la expresión común para el momento, se usa  $M = \frac{FLm(\beta_1)}{2}$  (según se muestra en la Figura 5). El momento de la sección transversal en la flexión, con referencia a la bibliografía, debe ser más bien constante después de haberse vuelto completamente plástica.

El inventor ha encontrado por tanto que:  $\int Fds \neq \int \frac{FLm(\beta_1)}{2} d\beta_1$

40 Razonablemente, debe ser una relación entre la distancia del recorrido de la cuchilla, S y el ángulo de flexión,  $\beta_1$ , que da la expresión correcta y, por tanto, consigue un equilibrio de energía. Al investigar la no linealidad entre S y  $\beta_1$ , la verdadera relación entre la fuerza aplicada, F y la sección transversal, M, fue deducida por el inventor, como sigue a continuación.

Tomando la primera derivada de la función geométrica, la ecuación (2) se obtiene:

$$\frac{dS}{d\beta_1} = \frac{L_0 - (R_k + R_d + t) \cdot \text{Sen}(\beta_1)}{\text{Cos}(\beta_1)^2} = \frac{L_e}{\text{Cos}(\beta_1)^2} \quad \dots(3)$$

La función siguiente:

$$L_e = L_0 - (R_k + R_d + t) \cdot \text{sen}(\beta_1)$$

5  $L_e$  es casi igual al brazo del momento en la flexión, excepto por el grosor del material,  $t$ .

Geoméricamente, el brazo del momento real es (véase la Figura 3a):

$$L_m(\beta_1) = L_0 - (R_k + R_d) \cdot \text{Sen}(\beta_1)$$

La expresión de equilibrio de energía, ecuación (1), se puede expresar de la siguiente manera usando la derivada, ecuación (3):

$$\int F \cdot ds = \int M \cdot 2 \frac{d\beta_2}{d\beta_1} \cdot d\beta_1 = \int M \cdot 2 \frac{d\beta_2}{d\beta_1} \cdot \frac{d\beta_1}{dS} dS$$

$$\Rightarrow F = M \cdot 2 \frac{d\beta_2}{d\beta_1} \cdot \frac{d\beta_1}{dS} = M \cdot 2 \frac{d\beta_2}{d\beta_1} \cdot \frac{\text{Cos}(\beta_1)^2}{L_e}$$

10

Aquí se ha introducido un nuevo ángulo,  $\beta_2$ , es decir, el ángulo real que está en la flexión debido al equilibrio de energía, y que es diferente del ángulo de flexión geométrico aplicado  $\beta_1$ , (véase la Figura 3a). Para ángulos de flexión pequeños,  $\beta_1$ , es cierto que el momento de la sección transversal,  $M$ , es igual a  $\frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2}$  llamado  $M_1$  en esta memoria.

15

Suponiendo que para grandes ángulos de flexión, el momento total,  $M_{tot}$ , es la suma de  $M_1$  y  $M_2$  donde  $M_2$  es una función desconocida pero que se supone que es un múltiplo de la función  $M_1$ ,  $M_{tot}$  que se puede expresar de la manera siguiente:

$$M_{tot} = M_1 + M_1 \times f(\beta_1) = M_1 \times (1 + f(\beta_1)) = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2} \times (1 + f(\beta_1))$$

Para equilibrar la expresión del equilibrio de energía, la relación:

$$\frac{d\beta_2}{d\beta_1}$$

20 se acepta que es igual a:

$$\frac{L_e}{L_m}$$

lo que da:

$$F = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2} \times (1 + f(\beta_1)) \cdot 2 \frac{L_e(\beta_1)}{L_m(\beta_1)} \cdot \frac{\text{Cos}(\beta_1)^2}{L_e(\beta_1)}$$

Por tanto;

25

$$F = F \cdot \text{Cos}(\beta_1)^2 \times (1 + f(\beta_1))$$

De ello se deduce que:

$$f(\beta_1) = \text{Tan}(\beta_1)^2,$$

$$(i.e. \frac{1}{\cos^2(\beta)} = 1 + \tan^2(\beta) )$$

Finalmente, la expresión para el momento de la sección transversal, M, se convierte entonces en:

$$M = \frac{F \cdot Lm(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)}$$

5 Esta formulación correcta del momento de la sección transversal, M, que predice con mayor precisión el comportamiento de flexión de los materiales metálicos, es incluso válida para ángulos de flexión grandes (es decir, ángulos mayores de 6°).

La Figura 6 muestra el momento total, M<sub>tot</sub> como una suma de M<sub>1</sub> y M<sub>2</sub>. La expresión común, M<sub>1</sub> es válida solo para ángulos de flexión pequeños (es decir, ángulos de hasta aproximadamente 6°). El ángulo β<sub>2</sub> es el ángulo real al que se ha flexionado el material, no es igual al ángulo de flexión, β<sub>1</sub>, aplicado.

10 Teóricamente se puede confirmar que esta solución de la invención es válida incluso si además la pestaña se curva, es decir, el punto de contacto se produce al ángulo β<sub>c</sub> en lugar de β<sub>1</sub> (véase la Figura 6), como suele ser el caso durante la flexión. Así:

$$\begin{aligned} M &= \frac{d}{d\beta_2} \left[ \frac{\text{Energía}}{2} \right] = \frac{d}{d\beta_1} \left[ \int \frac{F_y}{2} \cdot \frac{dS_y}{d\beta_1} d\beta_1 + \int \frac{F_x}{2} \cdot \frac{dS_x}{d\beta_1} d\beta_1 \right] \cdot \frac{d\beta_1}{d\beta_2} = \\ &= \frac{d}{d\beta_1} \left[ \int \frac{F_y}{2} \cdot \frac{dS_y}{d\beta_1} d\beta_1 + \int \frac{F_y}{2} \tan \beta_c \cdot \frac{dS_x}{d\beta_1} d\beta_1 \right] \cdot \frac{L_m}{L_e} = \\ &= \frac{F_y}{2} \cdot \left[ \frac{dS_y}{d\beta_1} + \tan \beta_c \cdot \frac{dS_x}{d\beta_1} \right] \cdot \frac{L_m}{L_e} \end{aligned}$$

Donde los movimientos del punto de contacto son descritos por;

$$\begin{aligned} \frac{dS_y}{d\beta_1} &= \frac{d}{d\beta_1} [S - R_k \cdot (1 - \cos \beta_c)] = \frac{L_e}{\cos^2 \beta_1} - R_k \sin \beta_c \cdot \frac{d\beta_c}{d\beta_1} \\ \frac{dS_x}{d\beta_1} &= \frac{d}{d\beta_1} [R_k \cdot \sin \beta_c] = R_k \cos \beta_c \cdot \frac{d\beta_c}{d\beta_1} \end{aligned}$$

15 S, es el movimiento vertical de la cuchilla, S<sub>x</sub>, es el movimiento horizontal del punto de contacto en la cuchilla, y S<sub>y</sub> es el movimiento vertical total del punto de contacto, teniendo en cuenta que éste se mueve hacia arriba a lo largo de la superficie de la cuchilla.

De ahí;

$$M = \frac{F_y}{2} \cdot \frac{L_e}{\cos^2 \beta_1} \cdot \frac{L_m}{L_e} = \frac{F_y}{2} \cdot \frac{L_m}{\cos^2 \beta_1}$$

20 La invención presente comprende también un portador que contiene un código de programa informático que significa que, cuando se ejecuta en un ordenador o al menos en un procesador, causa que el ordenador o al menos el procesador realice el método según una realización de la invención presente (es decir, por lo que los medios del código del programa informático pueden ser usados para calcular el momento de la sección transversal, M, y/o cualquiera de las otras propiedades del material metálico descrito en esta memoria), en donde el portador es uno de una señal electrónica, señal óptica, señal de radio o medio de almacenamiento legible por ordenador.

Los medios de almacenamiento típicos legibles por ordenador incluyen una memoria electrónica como la RAM, ROM, memoria flash, cinta magnética, CD-ROM, DVD, disco Bluray, etc.

30 La invención presente comprende además un producto de programa informático que comprende instrucciones de software que, cuando se ejecutan en un procesador, realizan el paso de cálculo de un método según una realización de la invención presente.

La invención presente comprende además un aparato que comprende un primer módulo configurado para realizar el paso de cálculo de un método según una realización de la invención presente, y opcionalmente un segundo módulo configurado para realizar el paso de cálculo de un método según una realización adicional de la invención presente.

Por ejemplo, el primer módulo puede ser configurado para realizar un paso de cálculo para calcular el momento M de la sección transversal, con el segundo módulo opcional configurado para realizar un paso de cálculo para calcular otra propiedad del material metálico, tal como la tensión del flujo, la deformación principal etc.

5 La invención se refiere además a un método en el que dicho momento de la sección transversal calculado, M, o la tensión del flujo calculada,  $\sigma_1$ , o el módulo de Young estimado, E, o la relación M/M<sub>e</sub>, u otra propiedad calculada que utilizan los métodos descritos en esta memoria, son usados para optimizar un producto que comprende dicho material metálico.

10 La relación adimensional M/M<sub>e</sub> que se describe con más detalle en el Ejemplo 2 es particularmente útil, ya que muestra el punto en el que un material se vuelve inestable durante la flexión. Específicamente, cuando M/M<sub>e</sub> está por debajo de 1,5, el material es estable durante la flexión. Cuando M/M<sub>e</sub> alcanza el nivel de 1,5, el material se vuelve inestable y por eso está cerca del fallo.

15 Por tanto, la invención se refiere a un método para determinar las condiciones bajo las cuales M/M<sub>e</sub> permanece por debajo de 1,5 para un material dado. Con el conocimiento de estas condiciones, un experto en la materia puede determinar la idoneidad de un material en particular para una aplicación determinada. Por ejemplo, un experto en la materia puede determinar fácilmente si un material puede flexionar bajo una configuración deseada sin fallos, lo que permite predecir la idoneidad del material sin ensayos exhaustivos. Por tanto, este método puede comprender el paso adicional de utilizar el material como elemento estructural en un producto compuesto, caracterizado por que el material es flexionado en condiciones en donde la relación de M/M<sub>e</sub> es inferior a 1,5 durante la fabricación del producto compuesto.

20 La invención se refiere también a un método para determinar el punto en el que un material metálico se vuelve inestable durante la flexión, dicho método comprende determinar el punto en el que la relación M/M<sub>e</sub> es 1,5.

El método se puede usar también para evaluar diferentes materiales metálicos para determinar qué materiales tienen propiedades de flexión que cumplen con los valores predeterminados necesarios para un cierto uso.

25 Ventajosamente, las características del momento obtenidas para diferentes materiales pueden ser superpuestas también, lo que permite predecir el comportamiento de la sección transversal de los materiales multicapa. De esta manera, un experto en la materia puede usar la metodología de la invención para diseñar nuevos materiales compuestos y predecir las propiedades de flexión de los materiales de múltiples capas basándose en el conocimiento de las capas individuales.

30 Por ejemplo, los materiales metálicos de alta resistencia, tales como el acero de alta resistencia, tienen con frecuencia malas propiedades de flexión. Añadir una capa de material más dúctil y de menor resistencia puede proporcionar materiales compuestos con propiedades de flexión mejoradas. Usando la metodología de la invención, un experto en la materia puede, sin experimentación excesiva, determinar qué tipo de material se requiere para proporcionar las propiedades de flexión deseadas al material de alta resistencia.

35 En el Ejemplo 5 se proporcionan más detalles sobre cómo las características del momento para diferentes materiales pueden ser superpuestas.

El método se puede usar también para evaluar placas del mismo material metálico que tienen diferentes espesores, por ejemplo, mediante el estudio de la relación de M/M<sub>e</sub>.

Los siguientes ejemplos implementan la metodología de la invención para investigar y caracterizar las propiedades de varios aceros durante la flexión.

40 **Ejemplo 1**

Para confirmar la corrección de la nueva expresión para el momento de la sección transversal, M, la fuerza de flexión, F, se calculó usando datos de tensión a tracción. El material metálico investigado fue: Domex 700 MC<sup>TM</sup>, un acero laminado en caliente de alta resistencia con un espesor de 2,1 mm. Datos de flexión: ancho del troquel L<sub>o</sub> = 70,5 mm, radio de la cuchilla R<sub>k</sub> = 16 mm y radio del rodillo R<sub>d</sub> = 25 mm.

45 Los datos de tracción son:

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$$

Conversión de datos de tracción a la tensión del flujo y la deformación simple, como:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma} \quad \text{y} \quad \epsilon_1 = \bar{\epsilon} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

suponiendo que

$$\beta_2 \approx \beta_1 \text{ (ya que } \beta_2 = \beta_1 - \int \frac{t \cdot \text{sen} \beta_1}{L} \text{ y } L \gg t \text{)}$$

entonces;

$$L_m(\beta_2 (i=0) = 0) = L_0 \text{ y } \beta_2 (i+1) = \varepsilon_1 (i+1) \cdot \frac{L_m(\beta_2 (i))}{t}$$

La expresión para el momento total, M, puede ser escrita como:

$$M = 2 \cdot B \cdot R^2 \int \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon = \frac{B \cdot t^2}{2 \cdot \varepsilon_1^2} \int \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon = \frac{B \cdot t^2}{2 \cdot \varepsilon_1^2} \int \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon_1$$

5 ...(4)

Combinándolo con la expresión de la invención:

$$M = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)} \text{ y haciendo que } \beta_2 = \beta_1$$

entonces la fuerza, F, pasa a ser;

$$F = \frac{2 \cdot \cos^2(\beta_2)}{L_m(\beta_2)} \cdot \frac{B \cdot t^2}{2 \cdot \varepsilon_1} \int \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{\sigma} \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon_1$$

10 La relación entre el ángulo de flexión,  $\beta_2$ , y la posición de la cuchilla, S, viene dada por:

$$\frac{dS}{d\beta_2} = \frac{dS}{d\beta_1} \cdot \frac{d\beta_1}{d\beta_2} \approx \frac{L_e}{\cos^2(\beta_2)} \cdot \frac{L_m}{L_e} = \frac{L_m}{\cos^2(\beta_2)}$$

Por tanto:

$$S \approx \int \frac{L_m(\beta_2)}{\cos^2(\beta_2)} \cdot d\beta_2$$

15 Al usar los datos de tracción, que se muestran en la Figura 8, se puede obtener una estimación de la fuerza de flexión (véase la Figura 8), lo que confirma la exactitud de la expresión de la invención para el momento de la sección transversal, M.

20 La Figura 9 muestra una comparación entre la fuerza de flexión calculada (curva 12) basada en los datos de prueba de tracción y tres ensayos de flexión individuales realizados sobre el mismo material pero con diferente longitud del recorrido, S. Los lados derechos de las tres curvas de prueba de flexión representan la descarga. La línea de flexión fue situada a lo largo de la dirección de rodadura (RD) y los datos del ensayo de tracción se realizaron perpendiculares a la dirección de rodadura (TD).

25 La Figura 10 ilustra esquemáticamente una bobina de un producto de acero laminado en caliente 10 del que se pueden cortar muestras para un ensayo de flexión. Los ensayos de flexión pueden ser realizados tanto en la dirección de rodadura (RD) como en una dirección transversal a la rodadura (TD). Además, los ensayos pueden realizarse preferiblemente también dando la vuelta a las muestras con el lado del laminador hacia arriba y hacia abajo, verificando la simetría de las texturas. La Figura 10 muestra la orientación de la curva respecto a una bobina de producto de acero laminado en caliente 10.

30 Este ejemplo mostró que el material metálico 10 tiene un comportamiento similar durante un ensayo de flexión y un ensayo de tracción. Como un ensayo de tracción es un valor medio de las propiedades de la sección transversal, en comparación con la flexión donde las propiedades se "escanean" desde la superficie exterior y hacia el interior, este caso muestra que el material metálico 10 se comportó uniformemente en todo su espesor. Además, la Figura 9 muestra que la fuerza disminuye de manera natural, y no debido a fallos en este caso, lo que ilustra las deficiencias en el ensayo de la norma VDA 238-100.

**Ejemplo 2**

En este ejemplo, se ejemplifica un momento adimensional (según se describe en la publicación titulada "Plastic Bending Theory and Application" de T.X. You y L. C. Zhang, ISBN 981022267X). El momento adimensional puede ser conocido por la relación entre el momento de máxima sección transversal,  $M_{max}$  y el momento de la sección transversal elástica;  $M_e$ . Esta relación tiene dos límites; un límite inferior que es igual a 1,0 y un límite superior igual a 1,5. El primer caso es cuando el material se deforma elásticamente; El último caso es el estado que el material alcanza en su momento máximo absoluto. Anteriormente, no ha sido posible obtener las características en el estado plástico del material entre estos límites. La Figura 11 muestra las ecuaciones que representan estos dos límites, es decir, el momento teórico de la sección transversal elástica,  $M_e$  y el momento máximo de la sección transversal,  $M_{max}$ , al flexionar, y también dibujos esquemáticos de las distribuciones de tensión en ambos casos.

- 5
- 10 Los límites inferior y superior de la relación son los siguientes, usando las dos ecuaciones mostradas en la Figura 11:

$$\frac{M_e}{M_e} = 1.0 \qquad \frac{M_{max}}{M_e} = \frac{6}{4} = 1.5$$

Sin embargo, para obtener toda la respuesta del material metálico en todo el intervalo desde el estado elástico hasta la capacidad máxima de carga, la expresión se escribe como:

$$1 \leq \frac{M(\beta_2)}{M_e(\beta_2)} \leq 1.5$$

- 15 donde  $M(\beta_2)$  es la nueva función de la invención.

El material metálico 10 que se investigó en este ejemplo fue: Docol 1180 DP™, un acero de grado de fase dual reducido en frío de alta resistencia que tiene un espesor de 1,43 mm.

- 20 La Figura 12 muestra la fuerza aplicada contra la posición S de la cuchilla durante la flexión en un ensayo de la norma VDA 238-100. A partir del ensayo de flexión, las respuestas se obtuvieron midiendo la fuerza aplicada y la posición de la cuchilla. El material fue probado en la dirección transversal (TD) y a lo largo de la dirección de rodadura (RD). A continuación, la fuerza fue transformada al momento de la sección transversal calculada,  $M$ , usando la nueva expresión de la invención (véase la Figura 13). El ángulo  $\beta_2$ , se obtuvo restando el ángulo de fallo,  $\Delta\beta_2$ , (es importante tenerlo en cuenta al calcular la recuperación del muelle, es decir, el ángulo de sobreflexión) al  $\beta_1$ , ángulo de flexión aplicado, calculado como se indica a continuación:

- 25 Usando la relación basada en la condición para el equilibrio de energía:

$$\frac{d\beta_2}{d\beta_1} = \frac{L_e}{L_m}$$

Entonces  $\beta_2$  se puede obtener a partir de la integral:

$$\beta_2 = \int \frac{L_e}{L_m} d\beta_1 = \beta_1 - \int \frac{L_e \cdot \text{Sen}(\beta_1)}{L_m(\beta_1)} d\beta_1 = \beta_1 - \Delta\beta_2$$

donde  $\beta_1$ , se calcula usando la ecuación (2).

- 30 La relación  $M/M_e$  fue deducida por el inventor como:

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{\left( \left( \frac{dM}{d\beta_2} / \frac{M}{\beta_2} \right) + 2 \right)}$$

...(5)

La expresión se puede verificar fácilmente para la parte elástica de la deformación, como la derivada

$$\frac{dM}{d\beta_2}, \text{ es igual a la relación } \frac{M}{\beta_2}, \text{ es decir: } \left( \frac{2E'I}{L_m} \right)$$

haciendo que la relación sea igual a 1.0.

Cuando la derivada

$$\frac{dM}{d\beta_2} = 0$$

entonces la relación es igual a 1,5. Esto significa que cuando el momento M cae, el material está fallando o la deformación está localizada.

- 5 Al aplicar la ecuación (5) en este ejemplo, el diagrama del momento adimensional calculado,  $M/M_e$  es como se muestra en la Figura 14.

La tensión del flujo también se puede obtener a partir del momento deducido de la ecuación (4):

$$\sigma_1 = \frac{2}{B \cdot t^2 \cdot \epsilon_1} \cdot \frac{d}{d\epsilon_1} (M \cdot \epsilon_1^2)$$

Donde la deformación principal,  $\epsilon_1$  es calculada a partir de:

$$\epsilon_1 = \beta_2 \cdot \frac{t}{L_m(\beta_1)}$$

10

La Figura 15 muestra un gráfico de las tensiones de flujo contra la deformación principal,  $\epsilon_1$ .

El uso del método según la invención presente hace posible usar el comportamiento de flexión de un material metálico para estimar el módulo de Young del material metálico, E.

El módulo de Young en caso de deformación simple, E', viene dado por:

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

15

Para el acero, esto se puede expresar como:

$$E' \approx \frac{E}{(1 - 0.3^2)}$$

En este ejemplo, el módulo de Young estaba dado por:

2,18·10<sup>5</sup> MPa la Figura 16 muestra un gráfico de la deformación principal,  $\epsilon_1$  en función del esfuerzo de flujo,  $\sigma_1$ ,

- 20 Otra forma de obtener el módulo de Young, E es mediante la determinación del gradiente de la parte elástica de la curva del momento (como la que se muestra en la Figura 13), donde el gradiente es:

$$\left( \frac{2 \cdot E' \cdot I}{L_m} \right)$$

La relación entre la tensión efectiva y la deformación, la tensión del flujo,  $\sigma_1$ , se puede convertir usando las expresiones siguientes, asumiendo unas condiciones de deformación simple:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sigma_1 \quad \text{y} \quad \bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \epsilon_1$$

25

y convertir a los valores reales usando

$$\sigma_{tr} = \bar{\sigma} \cdot (1 + \bar{\epsilon}) \quad \text{y} \quad \epsilon_{tr} = \bar{\epsilon} \cdot LN(1 + \bar{\epsilon})$$

- 30 Incluso es posible trazar y comparar el gráfico con los datos del ensayo de tracción. Esto indica cómo debe actuar el comportamiento de endurecimiento si las propiedades del material metálico son las mismas desde su superficie hasta su centro. Si los resultados de los mecanismos de deformación durante la flexión y durante la tensión pura son similares, esto prueba que el material metálico es homogéneo en todo su espesor.

Para definir la relación  $M/M_e$  a partir de datos de tracción, se usa la siguiente expresión deducida:

$$\frac{M}{M_e} = \frac{\frac{B \cdot t^2}{2 \cdot \varepsilon_1} \int \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon_1}{\frac{B \cdot t^2 \cdot \sigma_1}{6}} = \frac{3}{\sigma_1 \cdot \varepsilon_1^2} \int \sigma_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot d\varepsilon_1 = \frac{3}{\bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon}^2} \int \bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon} \cdot d\bar{\varepsilon}$$

La Figura 17 muestra una comparación entre un ensayo de tracción y los ensayos de flexión. En el caso ilustrado, el material metálico parece endurecerse aproximadamente de manera similar, comparando la flexión y el estiramiento uniforme.

5 Según una realización de la invención, el método comprende el paso de obtener un momento de la sección transversal, M, de un material metálico y usarlo para estimar la recuperación con una elección libre de configuración de flexión.

10 Cuando hay flexión, la recuperación se compensa siempre haciendo un cierto número de grados de "sobreflexión" para obtener los grados finales de flexión. Es difícil estimar la cantidad de grados de "sobreflexión" para obtener finalmente la flexión deseada. Cuando se maneja un material tal como el acero de alta resistencia, es aún más complicado ya que el comportamiento de recuperación es mayor en comparación con un material como el acero dulce. Se usó un acero delgado (3,2 mm) de resistencia ultraalta (Hardox 450) para investigar el efecto de la recuperación en cuatro casos de la configuración para la flexión. La resistencia definitiva para Hardox 450 fue de aproximadamente 1400 - 1450 MPa.

15 El método comprende tres pasos (véase la Figura 18): en el primer paso, se prueba el material para determinar las características del material a la flexión, por ejemplo, realizando un tipo de flexionado del ensayo de la norma VDA 238-100, es decir, flexión libre de fricción, obteniendo una sección transversal completamente en estado plástico. En el segundo paso, la curva del momento es transformada respecto a la geometría de una configuración geométrica de libre elección para un determinado caso de flexión. En el tercer paso, estos datos son usados para calcular la recuperación. Incluso el grosor puede ser convertido a partir del material que ha sido investigado en el primer paso. El resultado más preciso se obtiene cuando se usa el mismo lote de material en los pasos primero y segundo, debido a las diferencias en las características del material.

25 Las características del material son obtenidas al realizar el ensayo de la norma VDA 238-100 u otro tipo de equipo de flexión libre de fricción, que proporciona una "huella digital" de un material actual, al obtener un diagrama de la curva del momento en función del ángulo. Al ensayar las características del material, se usa una anchura del troquel estrecha y un radio de la cuchilla pequeño, aproximadamente 0,7\*t para el material más grueso laminado en caliente. Los radios de los rodillos están libres de fricción, es decir, pueden girar. El ángulo de flexión máximo (la mitad del ángulo de flexión,  $\beta_1$ ) no debe ser más de 30 - 35°, eliminando todo tipo de fricción, agregando una energía de fallo no conectada al comportamiento del material.

30 Al usar un método según la invención presente, se puede obtener un diagrama del momentos, tal como el diagrama del momentos mostrado en la Figura 13, basado en la fuerza medida contra la posición de la cuchilla, tal como el diagrama que se muestra en la Figura 4, y la geometría para la configuración de prueba.

$R_d$  representa el radio del rodillo y puede tener, por ejemplo, 40,0 mm, el radio de la cuchilla puede ser de 2,0 mm, t (el grosor del material) puede ser de 3,2 mm,  $L_o$  la mitad del ancho del troquel puede ser de 46 mm y finalmente, B, la longitud del material (es decir, la longitud de flexión) puede ser de 75 mm.

35 El inventor ha descubierto que si el radio de la cuchilla es mayor respecto al grosor del material y si se usa un ancho del troquel mayor (en comparación con el ensayo de la norma VDA 238-100), el material que se encuentra entre los soportes, es decir, la cuchilla, y los rodillos, están sometidos a una curvatura (véase la curva discontinua en las Figuras 19 y 20). Esto significa que el contacto entre la cuchilla y el material no está en el punto tangente de una línea recta, en lugar de eso está a un ángulo  $\beta_c$ , en lugar de  $\beta_1$ , dando como resultado un brazo del momento,  $L_N$ , que es más largo en comparación con  $L_m$  (véase la Figura 19). Para estimar el momento de la sección transversal reducida,  $M_L$ , se debe definir el punto de contacto real. Entonces, se debe obtener la curvatura. Se observa en la bibliografía que la forma o la curvatura del material (entre los puntos de contacto, la cuchilla y los rodillos) es proporcional a la energía complementaria (véase el área sombreada de la Figura 19).

45 El inventor ha descubierto que al estudiar la distribución completa de la energía dentro de una flexión (ilustrada en la Figura 20), se puede obtener la siguiente expresión para el ángulo de contacto,  $\beta_c$ :

$$\beta_c = \beta_2 - \frac{2}{M} \int \beta_2 dM$$

50 El ángulo de contacto,  $\beta_c$ , es aproximadamente igual a 0 durante la deformación elástica (véase la Figura 21). Esto se puede mostrar y confirmar usando la integral para el ángulo de curvatura,  $\beta_c$ , poniendo la expresión para el momento elástico. El ángulo de contacto,  $\beta_c$ , por tanto, comienza a aumentar en el momento en el que la flexión entra en estado plástico. En la Figura 21, la curva de puntos representa el ángulo de flexión, la curva de puntos representa el ángulo de flexión real, la curva de trazos y puntos representa el ángulo de contacto entre la cuchilla y el material y, finalmente, la curva sólida representa el ángulo de la forma de la pestaña.

La expresión para el brazo del momento real,  $L_m$ , dada en la página 16 puede ser usada cuando el radio de la cuchilla es pequeño, es decir, típicamente 0,7 veces el espesor del material o menos (es decir,  $R_k \leq 0,7t$ ). Sin embargo, cuando se considera un radio de cuchilla grande, resultará evidente que el material no entra en contacto con la cuchilla en la tangente para una línea recta, sino en el ángulo,  $\beta_c$ , mostrado en la Figura 19. En tal caso, el brazo del momento,  $L_N$ , es:

$$L_N = L_0 - R_d \cdot \text{sen}(\beta_1) - R_k \cdot \text{sen} \beta_c$$

Resultará evidente que, para radios de cuchillas grandes, la deformación deja de aumentar cuando el material comienza a seguir la curvatura de la cuchilla. En ese momento, la deformación se vuelve constante y estará limitada por el radio de la cuchilla, aunque el ángulo de flexión esté aumentando. El inventor ha descubierto que este nivel de deformación es posible calcularlo aplicando el ángulo de contacto,  $\beta_c$ , obtenido anteriormente.

Para la flexión libre donde el radio de la cuchilla es pequeño en comparación con el espesor del material, el radio de flexión se reduce libremente sin ninguna limitación. La sección transversal del momento,  $M$ , alcanza finalmente su máximo, es decir, está completamente en estado plástico. Si se usa un radio de cuchilla grande, el radio de flexión queda limitado por la geometría de la cuchilla, por lo que la sección transversal del momento,  $M$ , se reduce a un cierto nivel,  $M_L$ .

El inventor supuso lo siguiente, ya que el momento es linealmente dependiente respecto al eje horizontal,  $L$  (nuevamente con referencia a las Figuras 19 y 20);

$$\frac{L_m}{L_N} = \frac{M_L}{M} \Rightarrow M_L = M \cdot \frac{L_m}{L_N}$$

Donde  $M$  es el momento máximo, total, que el material puede alcanzar (transformado geoméricamente a partir del ensayo libre de fricción de referencia).  $M_L$  es el momento, limitado por el radio de la cuchilla, que representa el caso a ser simulado.

Si se usa un radio de cuchilla pequeño, entonces el movimiento del punto de contacto es despreciable, respecto a la longitud del brazo del momento, lo que da como resultado:  $M_L \approx M$ . Sin embargo, si se usa un radio de cuchilla grande, hay una diferencia entre el momento completo y  $M_L$ , ya que están situados en dos secciones transversales diferentes, a lo largo del eje  $L$ , por tanto, hay una diferencia entre  $L_N$  y  $L_m$ .

La expresión para calcular la fuerza de flexión,  $F$  fue deducida para que fuera:

$$F = \frac{2M \cos^2(\beta_1)}{L_N} = \frac{2M \cos^2(\beta_1)}{[L_0 - R_d \cdot \text{sen}(\beta_1) - R_k \cdot \text{sen} \beta_c]} = \frac{2M \cos^2(\beta_1)}{\left[ L_0 - R_d \cdot \text{sen}(\beta_1) - R_k \cdot \text{sen} \left| \beta_2 - \frac{1}{M} \int 2\beta_2 dM \right| \right]}$$

donde  $L_0$  = la mitad del ancho del troquel,  $R_k$  = radio de la cuchilla,  $R_d$  = radio del rodillo,  $\beta_1$  = ángulo de flexión [rad],  $\beta_2$  = ángulo de flexión real [rad] transformado geoméricamente del ensayo de referencia,  $M$  = el momento completo, obtenido del ensayo de referencia y transformado geoméricamente.

Es posible estimar el retorno,  $\Delta\beta_{tot}$ , de una manera muy precisa usando las ecuaciones siguientes:

$$\Delta\beta_{tot} = \beta_{C\,el} + \beta_{S\,el} + \Delta\beta_{12}$$

$$\beta_{C\,el} = \frac{M_L \cdot L_C}{E'I} = \frac{M_L \cdot \left( R_k + \frac{t}{2} \right) \cdot \beta_c}{2 E'I}$$

$$\beta_{S\,el} = \frac{M_L \cdot L_S}{2 E'I} = \frac{M_L}{2 E'I} \cdot \frac{L_N}{\cos(\beta_1)}$$

donde

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

donde  $\nu$  es la relación de Poisson y  $E$ , es el módulo de Young para el acero, esto se puede expresar como:

$$E' \approx \frac{E}{(1 - 0.3^2)}$$

Además,

$$\Delta\beta_{12} = \beta_1 - \beta_2 = \int_0^{\beta_1} \frac{t \cdot \text{sen}\beta_1}{L_m}$$

$$M_L = M \frac{L_m}{L_N}$$

La longitud aproximada de la pestaña que se está probando es:

5 
$$\frac{L_N}{\cos(\beta_1)}$$

y la longitud (a lo largo de la capa neutra) del material en contacto con la cuchilla es:

$$\left(R_k + \frac{t}{2}\right) \cdot \beta_C$$

10 La Figura 22 muestra la fuerza medida en función del desplazamiento más la curva obtenida de una flexión libre de fricción. Las líneas punteadas y discontinuas de la Figura 22 representan fuerzas calculadas usando un método según la invención presente y usando datos del ensayo de flexión de referencia realizada de manera similar a la norma VDA 238-100 (es decir, la curva de carga alta de la Figura 22). Las líneas continuas representan valores medidos reales. Se puede ver que usando un método según la invención presente, se puede obtener sustancialmente la fuerza de flexión exacta usando datos de un ensayo de referencia como entrada. Se encontró que los resultados obtenidos del cálculo de recuperación usando un método según la invención presente estaban muy en consonancia con los ensayos realizados.

15 Según una realización de la invención, el método comprende el paso de obtener un momento de la sección transversal, M del material metálico realizando un ensayo de flexión libre de fricción según la norma VDA 238-100, o un ensayo de flexión similar libre de fricción, y se usa el momento de la sección transversal, M para estimar un coeficiente de fricción del material metálico, por lo que un coeficiente de fricción puede ser determinado durante la producción.

20 La fuerza de flexión y la posición de la cuchilla deben ser medidas durante todo el ciclo de flexión. Si la fuerza de flexión aumenta más de lo que el material metálico puede absorber en forma de energía (energía plástica y elástica), esto se debe a la fricción. Al estudiar el comportamiento del momento de la sección transversal de un material metálico es posible aislar la pérdida de energía relacionada con la fricción. Por tanto, es posible estimar también el coeficiente de fricción del material metálico. Por tanto, un método de este tipo puede ser usado no solo para estimar la fricción del coeficiente de un material metálico en producción, sino también para determinar los coeficientes de fricción en general, usando un material ficticio con un comportamiento bien conocido como base para flexionar y agregar capas de materiales cuyas propiedades de fricción deben ser investigadas.

30 La Figura 23 muestra los vectores de fuerza que representan la carga de flexión durante un ensayo de flexión. El momento de la sección transversal, M, crea una fuerza normal, F<sub>N</sub> en función del radio del rodillo, por lo que se desarrolla una fuerza de fricción. El vector de fuerza vertical F<sub>y</sub> que actúa y se mide durante la flexión se muestra en la Figura 23 y se corresponde con la fuerza de flexión.

El coeficiente de fricción, μ, se calcula usando la ecuación siguiente:

$$\mu = \left[ \frac{M - M_{mtrl}}{M_{mtrl}} \right] \cdot \frac{1}{\tan \beta_1}$$

donde

35 
$$M_{Medido} = \frac{F_{yTOT} \cdot L_m}{2} \frac{1}{\cos^2 \beta_1}$$

y la fuerza total que actúa verticalmente es:

$$F_{yTOT} = \frac{M_{mtrl}}{L_m} \cos^2 \beta_1 + \frac{M_{mtrl}}{L_m} \cos \beta_1 \cdot \mu \cdot \sin \beta_1$$

por tanto;

$$\mu = \left[ \frac{M_{Medido} - M_{mtrl}}{M_{mtrl}} \right] \cdot \frac{1}{\tan \beta_1}$$

5 Donde el parámetro,  $M_{Medido}$ , representa las características del momento obtenidas de un ensayo en el que está involucrada la fricción.  $M_{mtrl}$  representa las características de referencia del material, obtenidas en un ensayo libre de fricción. Sin embargo, como las características del momento son casi constantes después de alcanzar el estado plástico total, este parámetro puede ser hecho constante (véase la línea continua gruesa en la Figura 24).

### Ejemplo 3

10 Se realizaron varios ensayos de flexión en acero laminado en caliente de alta resistencia, 6 mm, con condiciones diferentes, es decir, fricción baja y fricción extremadamente alta, jugando sin o con diferentes lubricantes usando el mismo tipo de material en todos los casos. En la Figura 25, se muestran las curvas de fuerza. Al convertir las fuerzas en el momento de la sección transversal usando la expresión de la invención, la influencia de la fricción se vuelve más evidente (véase la Figura 24) y es posible evaluarla mediante la expresión de la invención para estimar el coeficiente de fricción.

### 15 Ejemplo 4

Se ha realizado una comparación entre los ensayos de flexión que verifican la fórmula de la invención. Dentro de la serie de ensayos, se usan diferentes materiales, espesores y configuraciones de herramientas geométricas. En la Figura 26, se puede apreciar una buena correlación entre los ensayos y la fórmula de la invención. La Figura 27 muestra la comparación entre la fuerza medida experimentalmente ( $F_{max}$ ) y el ángulo calculado a  $F_{max}$ . En estos datos, B/t está entre 12 y 67.

En cuanto a la dispersión, no se supone fricción en el modelo. La resistencia máxima de los materiales flexionados no es verificada.

### Ejemplo 5

25 Este ejemplo proporciona una demostración de cómo se pueden calcular las características del momento de los materiales compuestos basándose en las características de sus materiales componentes. Por tanto, las propiedades de un material formado a partir de 5 mm de DX960 (es decir, la capa de base o el material del sustrato) y un material de capa superficial de 1 mm fabricado con DX355 (ambas formas de acero) pueden ser predichas basándose en las características del momento de los materiales individuales.

Tanto la deformación como el momento pueden ser transformados, usando las ecuaciones siguientes:

$$30 \quad \varepsilon_{Material\ de\ base} = \varepsilon_{Medido} \cdot \frac{t_{Material\ de\ Base}}{t_{Medido}}$$

El momento por unidad de longitud:

$$M/B = \frac{M_{Medido}}{B} \cdot \frac{(t_{Material\ de\ base})^2}{(t_{Medido})^2}$$

35 La Figura 28 muestra un gráfico de las características del momento de los materiales de base, con DX355 medido en  $t = 4$  mm y escalado hasta  $t = 6$  mm. En la Figura 28, se puede ver que el DX355 tiene un comportamiento de endurecimiento por deformación mucho mayor, lo que es preferible desde el punto de vista del rendimiento de la flexibilidad.

Para calcular la contribución del momento de una capa de revestimiento de 1 mm de DX355 junto con 5 mm de DX960 (es decir, dos capas de revestimiento de 0,5 mm de DX355 a cada lado de un núcleo de 5 mm de DX960), se usan los cálculos siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{M}{B}_{\text{Capa}} &= \left[ \frac{M}{B}_{\text{Capa } 6\text{mm}} - \frac{M}{B}_{\text{Capa } 6\text{mm}} \cdot \frac{(t_{\text{medido}} - t_{\text{capa}})^2}{(t_{\text{medido}})^2} \right] = \\ &= \left[ \frac{M}{B}_{\text{Capa } 6\text{mm}} \cdot \left( 1 - \frac{(6.0 - 1.0)^2}{(6.0)^2} \right) \right] \end{aligned}$$

Por tanto, las características del momento del material de espesor total,  $t_{\text{lleno}}$ , menos las características del momento para el espesor reducido,  $t_{\text{lleno}} - t_{\text{capa}}$ , proporcionan el impacto del momento (o contribución) de las capas del revestimiento.

- 5 El grosor del sustrato (o material de base) es en este caso:

$$t_{\text{lleno}} - t_{\text{capa}} = 6.0 - 1.0 = 5.0 \text{ mm}$$

Usando las expresiones anteriores, esto se convierte en:

$$\frac{M}{B}_{\text{Sustrato}} = \frac{M}{B}_{\text{Sustrato } 6 \text{ mm}} \cdot \frac{(t_{\text{medido}} - t_{\text{capa}})^2}{(t_{\text{medido}})^2} = \frac{M}{B}_{\text{Sustrato } 6 \text{ mm}} \cdot \frac{(6.0 - 1.0)^2}{(6.0)^2}$$

- 10 Las características del momento para la capa de revestimiento, capa de base y material compuesto se muestran en la Figura 29.

La Figura 30 muestra las curvas del momento libre de unidades para el material original de DX960 y las propiedades predichas del material compuesto que tiene 5 mm de DX960 y dos capas de revestimiento de 0,5 mm de DX355. Como se puede apreciar, se predice que el material compuesto tiene un momento libre de unidades de menos de 1,5 para las deformaciones más altas, lo que significa que se predice que los materiales serán más estables durante la flexión, con menos riesgo de fallo.

- 15 Otras modificaciones de la invención dentro del alcance de las reivindicaciones resultarán evidentes para una persona experta en la materia. En particular, la metodología de la invención permite al experto en la materia investigar las propiedades de materiales tales como el acero durante la flexión. En comparación con los valores de umbral predeterminados, el experto en la materia puede evaluar la idoneidad de materiales como el acero para un uso particular usando el método de la invención presente.
- 20

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para caracterizar un material metálico (10) comprendiendo los pasos de:

a. proporcionar una placa de material metálico (10) soportada simplemente entre dos rodillos paralelos, teniendo dichos rodillos el mismo diámetro;

5 b. flexionar la placa por medio de una fuerza exterior, F, por medio de una cuchilla de flexión, actuando dicha fuerza en un plano perpendicular al plano formado por los centros de los rodillos y que interseca la placa por la línea central entre los rodillos, extendiéndose dicha cuchilla de flexión al menos por toda la longitud de la placa;

c. el método se **caracteriza por** comprender el paso de calcular un momento de la sección transversal, M, del material metálico mediante la ecuación siguiente:

10 
$$M = \frac{F \cdot L_m(\beta_1)}{2 \cdot \cos^2(\beta_1)}$$

donde

F es la fuerza de flexión aplicada,

$L_m(\beta_1)$  es el brazo del momento en el ángulo  $\beta_1$ , calculado según la ecuación siguiente:

$$L_m(\beta_1) = L_0 - (R_k + R_d) \cdot \text{sen}(\beta_1)$$

15 donde

$L_0$  es la mitad del ancho del troquel,

$R_d$  es el radio del borde del troquel,

$R_k$  es el radio de la cuchilla, y

$\beta_1$  es el ángulo de flexión,

20 en donde el ángulo de flexión,  $\beta_1$ , es el ángulo movido por la superficie normal de la placa en el punto de contacto con uno de los rodillos durante la flexión mediante la fuerza exterior, calculado como  $90^\circ$  menos el ángulo agudo entre los vectores normales de los planos de inicio y flexionado de la placa, el plano de inicio correspondiente al plano formado por las líneas centrales de los dos rodillos paralelos, y el plano flexionado correspondiente al plano formado por la línea central de un rodillo y la línea de contacto entre ese rodillo y la placa, cuyo plano contiene la normal a la placa  
25 en el punto que hace contacto con el rodillo.

2. El método de la reivindicación 1, en donde el método comprende resolver la expresión de equilibrio de la energía:

$$\int F ds = \int 2Md\beta_2$$

donde  $\beta_2$  es el ángulo real al que es flexionada la placa, calculado de la manera siguiente:

$$\beta_2 = \beta_1 - \int \frac{t \cdot \text{Sen}(\beta_1)}{L_m(\beta_1)} d\beta_1$$

30 donde t es el espesor de la placa.

3. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** comprende el paso de calcular la tensión del flujo,  $\sigma_1$ , usando la ecuación siguiente:

$$\sigma_1 = \frac{2}{B \cdot t^2 \cdot \epsilon_1} \cdot \frac{d}{d\epsilon_1} (M \cdot \epsilon_1^2)$$

donde la deformación principal,  $\epsilon_1$  se calcula a partir de:

35 
$$\epsilon_1 = \beta_2 \cdot \frac{t}{L_m(\beta_1)}$$

donde B es la longitud de la muestra, t es el espesor de la muestra y  $\beta_2$  es el ángulo real al que es flexionado dicho material metálico (10) durante dicho ensayo de flexión.

4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** comprende el paso de estimar el módulo de Young, E, de dicho material metálico (10) trazando un gráfico de  $\beta_2$  y dicho momento de la sección transversal calculado, M y determinando el gradiente de la parte elástica de la curva del momento, según el cual el gradiente es:

$$5 \quad \left( \frac{2 \cdot E' \cdot I}{L_m} \right)$$

donde I es el momento de inercia y donde E' es el módulo de Young a deformación simple y viene dado por:

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

donde  $\nu$  es la relación de Poisson.

10 5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** comprende el paso de usar dicho momento de la sección transversal, M de dicho material metálico para estimar la recuperación de dicho material metálico usando las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_{tot} &= \beta_{C\,el} + \beta_{S\,el} + \Delta\beta_{12} \\ \beta_{C\,el} &= \frac{M_L \cdot L_C}{E'I} = \frac{M_L \cdot \left(R_k + \frac{t}{2}\right) \cdot \beta_C}{2 E'I} \\ \beta_{S\,el} &= \frac{M_L \cdot L_S}{2 E'I} = \frac{M_L}{2 E'I} \cdot \frac{L_N}{\cos(\beta_1)} \\ \Delta\beta_{12} &= \int \frac{t \cdot \sin \beta_1}{L_m} d\beta_1 \\ M_L &= M \frac{L_m}{L_N} \end{aligned}$$

la longitud aproximada de la pestaña que está siendo probada es:

$$\frac{L_N}{\cos(\beta_1)}$$

15 y la longitud del material metálico en contacto con la cuchilla es:

$$\left(R_k + \frac{t}{2}\right) \cdot \beta_C$$

20 donde:  $\Delta\beta_{tot}$  es la cantidad total de la recuperación,  $\beta_{set}$ , es la recuperación de la pestaña,  $\beta_{Cet}$ , es la recuperación respecto al material en contacto con la cuchilla,  $M_L$  es el momento reducido debido a la limitación de la curvatura de la cuchilla,  $L_N$  es el brazo del momento,  $L_S$  es la longitud de la pestaña,  $L_C$  es la longitud del material conformado por la cuchilla,  $R_k$  es el radio de la cuchilla y  $\beta_C$  es el ángulo de contacto entre el material metálico y la cuchilla.

6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** comprende el paso de usar dicho momento de la sección transversal, M de dicho material metálico para estimar un coeficiente de fricción,  $\mu$ , de dicho material metálico usando la ecuación:

$$\mu = \left[ \frac{M - M_{mtrl}}{M_{mtrl}} \right] \cdot \frac{1}{\tan \beta_1}$$

25 donde  $M_{mtrl}$ , es el momento de la sección transversal obtenido usando un equipo de ensayo de flexión libre de fricción.

7. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** dicho momento de la sección transversal calculado, M, o la tensión del flujo calculada,  $\sigma_1$ , o el módulo de Young estimado, E, es usado para optimizar un producto que comprende dicho material metálico (10).

30 8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** dicho material metálico (10) es un material metálico laminado en caliente (10), tal como acero laminado en caliente.

9. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado por que** dicho material metálico (10) es un material metálico laminado en frío, tal como acero laminado en frío.

10. Método para caracterizar un material metálico (10) según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** comprende los pasos para realizar un ensayo de flexión según la norma VDA 238-100.

11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** el método comprende calcular la relación  $M/M_e$ , definida como:

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{\left( \left( \frac{dM}{d\beta_2} / \frac{M}{\beta_2} \right) + 2 \right)}$$

- 5
12. El método de la reivindicación 11, en donde la relación  $M/M_e$  es calculada para al menos dos materiales diferentes, y las propiedades de un material compuesto que comprende estos materiales son calculadas a partir de los valores de los materiales individuales.
- 10 13. Un método para determinar las condiciones bajo las que un material permanece estable durante la flexión, comprendiendo dicho método el método de la reivindicación 11 y **caracterizado además por** determinar las condiciones bajo las que la relación  $M/M_e$  permanece por debajo de 1,5.
14. El método de cualquier reivindicación precedente, en donde el radio de la cuchilla,  $R_k$ , es menor o igual que el espesor del material metálico,  $t$ .
- 15 15. El método de cualquier reivindicación precedente, en donde el radio de la cuchilla,  $R_k$ , es 0,7 veces el espesor del material metálico,  $t$ , o menos.
16. Producto de programa informático (30), **caracterizado por que** comprende un programa informático que contiene medios de código de programa informático dispuestos para causar que un ordenador o un procesador ejecute el paso de cálculo de un método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, almacenado en un medio legible por ordenador o una onda portadora.

20

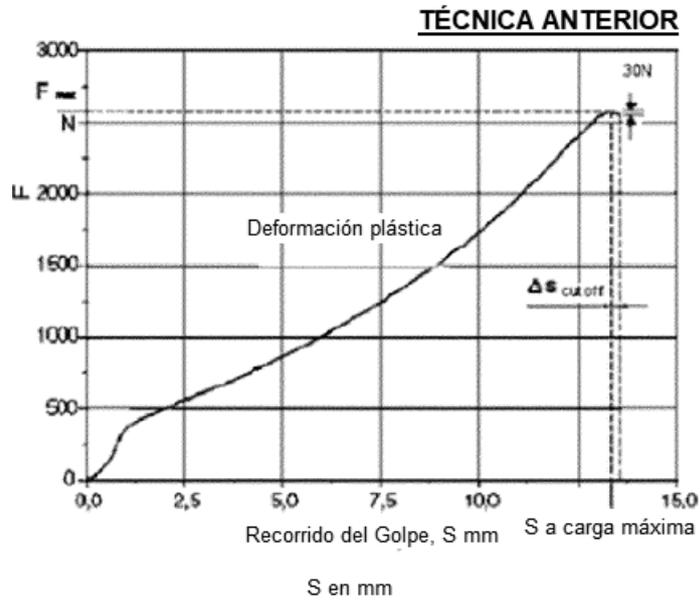


Fig. 1

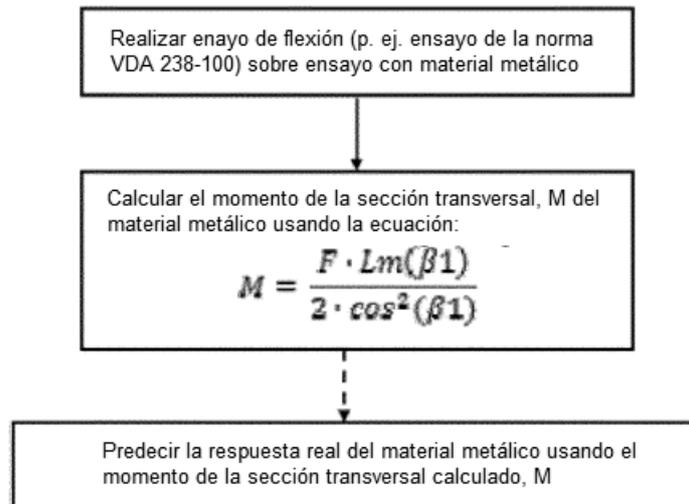
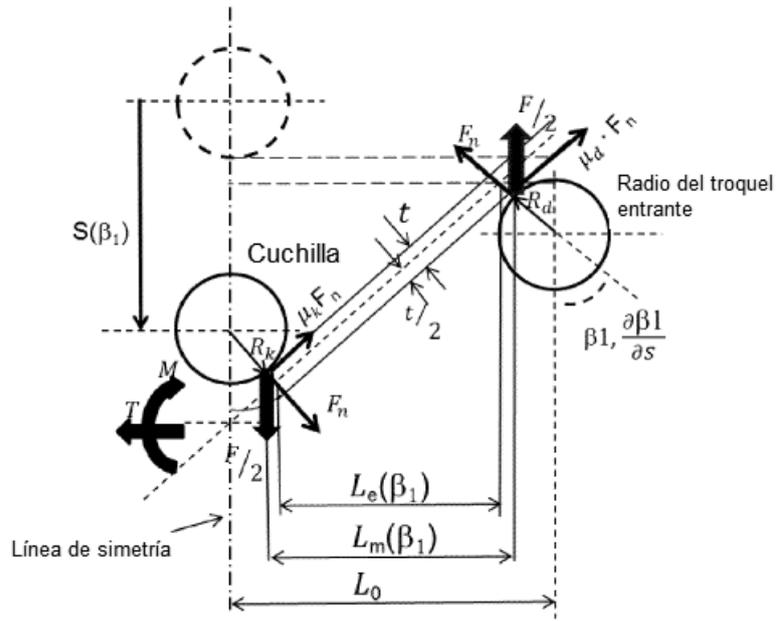
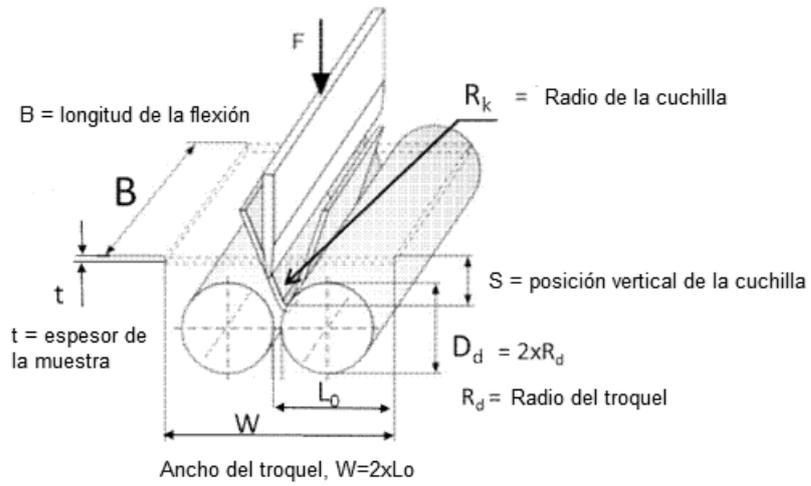


Fig. 2



F = fuerza aplicada



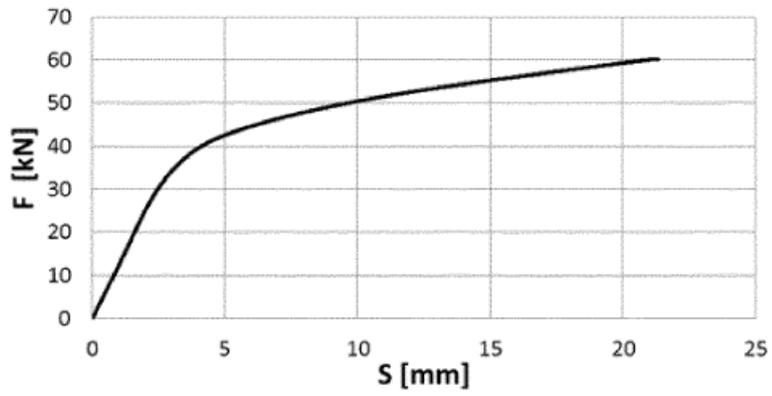


Fig. 4

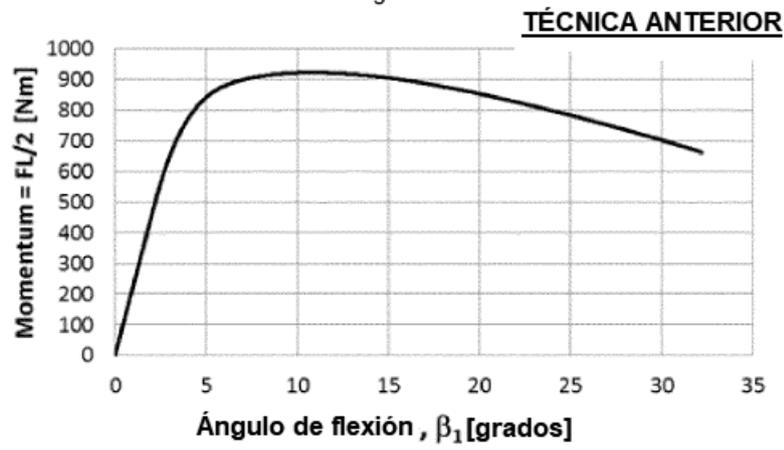


Fig. 5

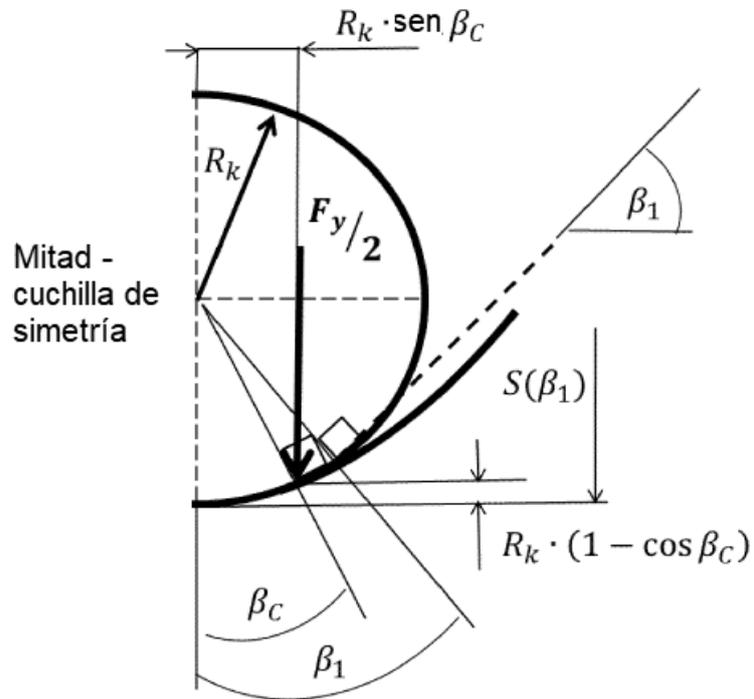


Fig. 6

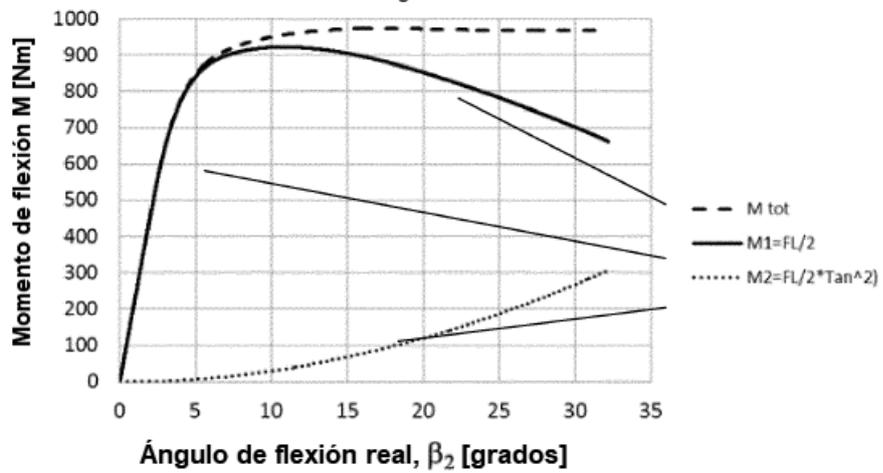


Fig. 7

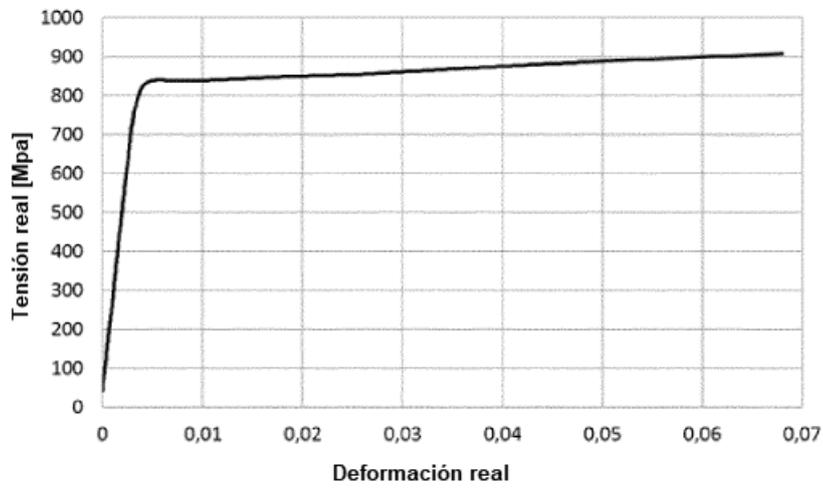


Fig. 8

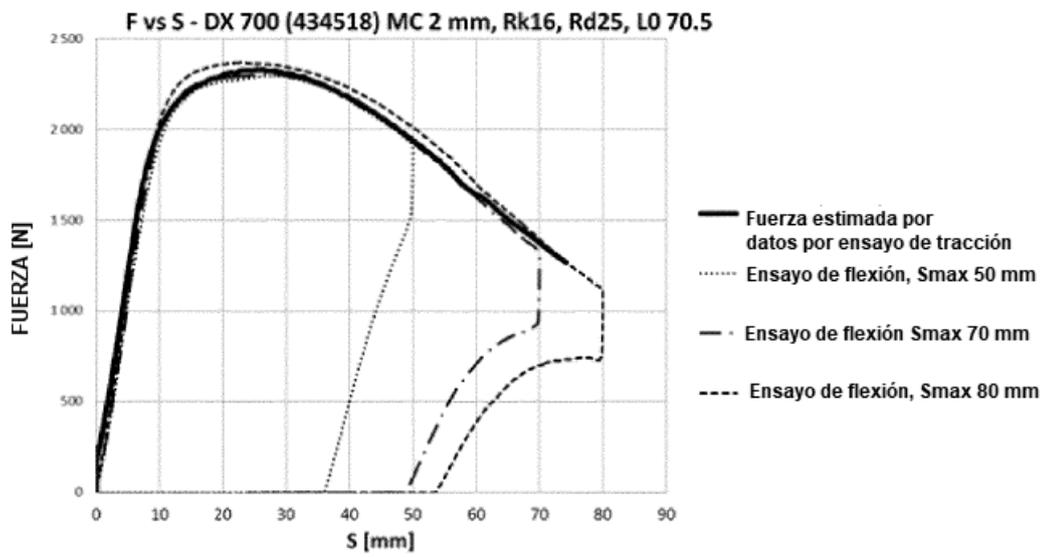


Fig. 9

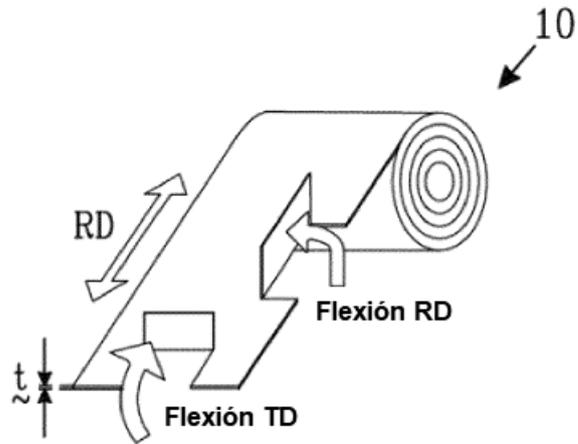


Fig. 10

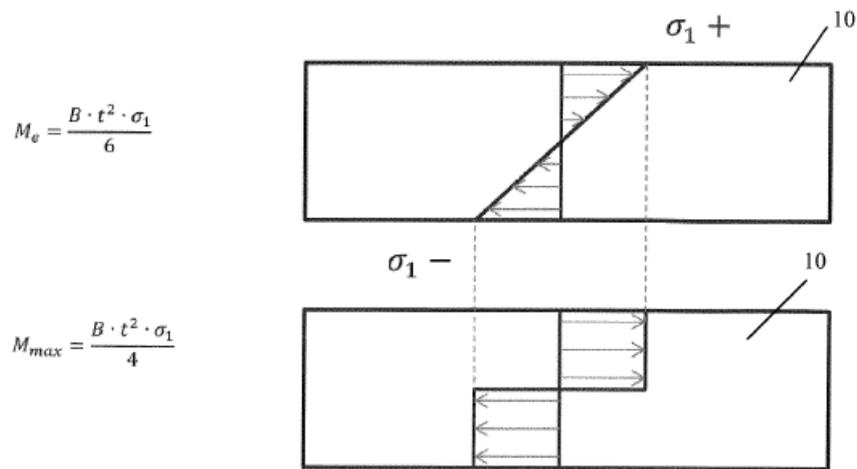
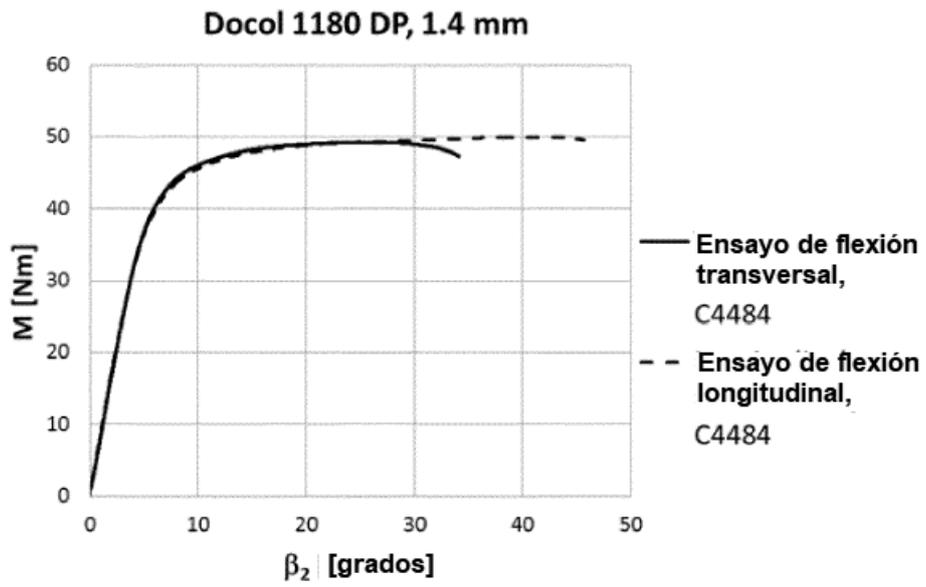
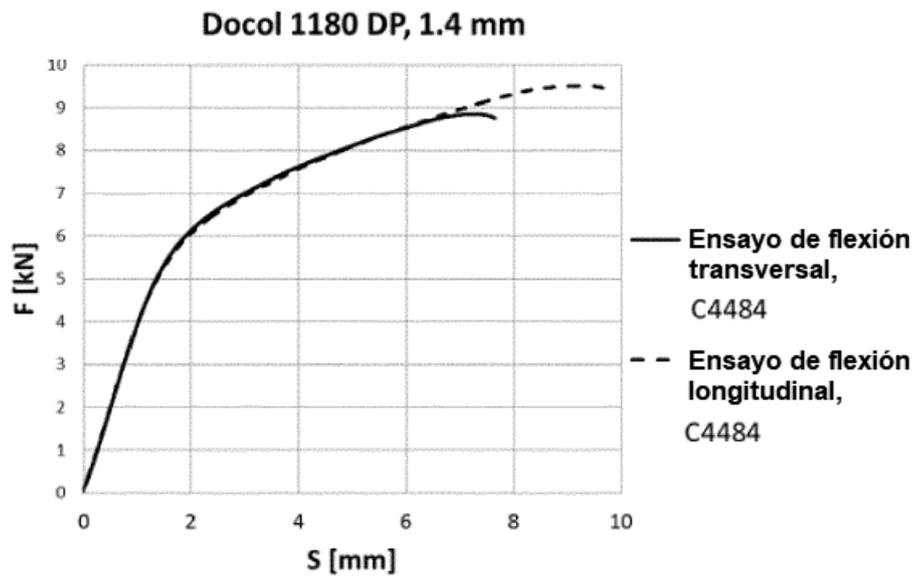


Fig. 11



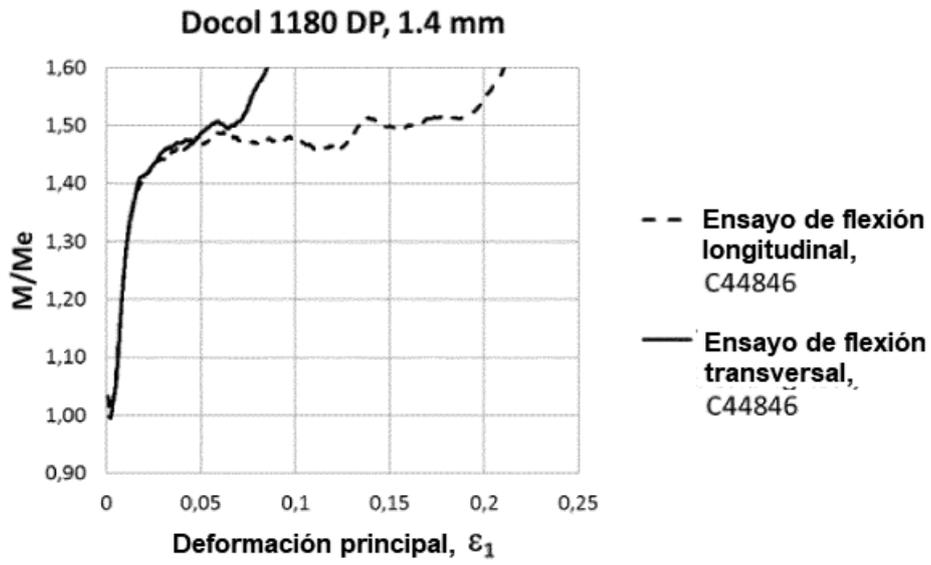


Fig. 14

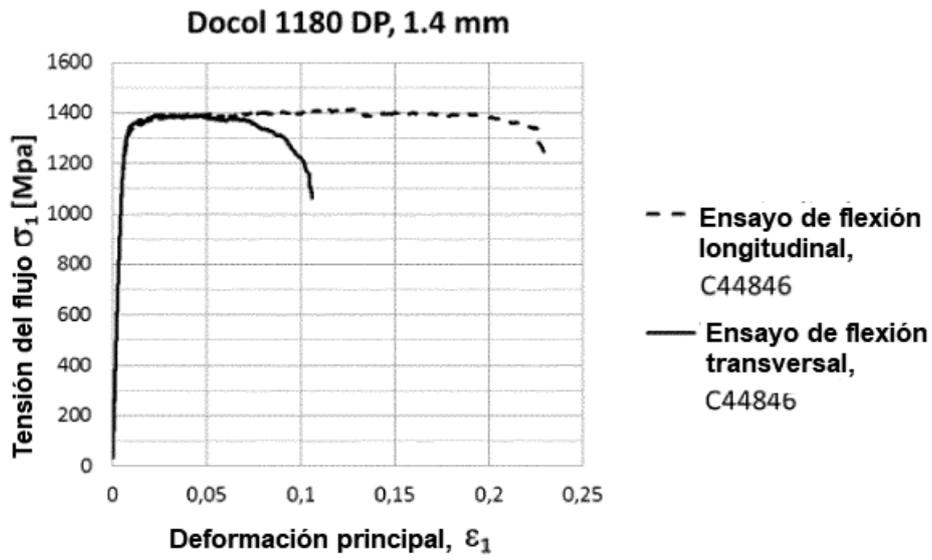
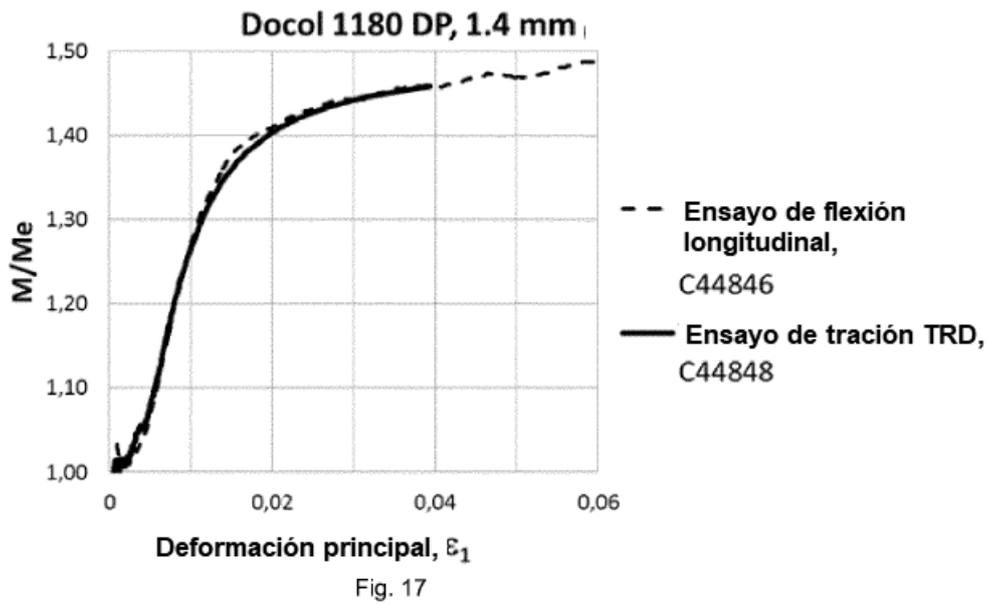
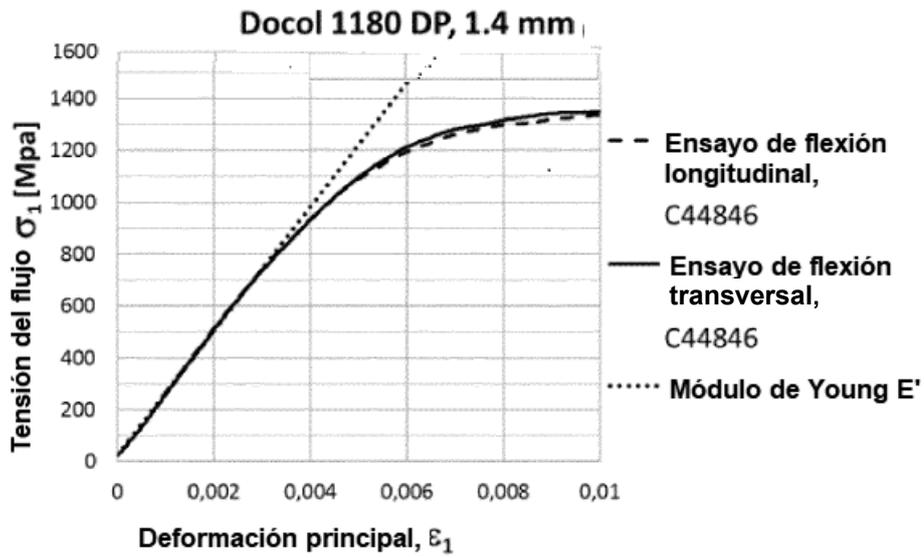


Fig. 15



**Ensayo de referencia, i.e obtener "huella digital" del material.**  
**Realizar ensayo norma VDA 238-100 u otro tipo de flexión**  
**libre de fricción, con cuchilla pequeña respecto al espesor**  
**y con un ancho estrecho del troquel**

Calcular la curva del Momento,  $M_1(\varepsilon_2)$  con ensayo de referencia

Hacer una transformación geométrica con el caso a  
 ser analizado:  $\varepsilon_{22} = \varepsilon_2 \cdot \frac{t_2}{t_1}$ ,  $M_2 = M_1 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \cdot \frac{B_2}{B_1}$

Calcular el ángulo de flexión mediante:  $\beta_{22} = \frac{\varepsilon_{22} \cdot L_m}{t_2}$

Calcular el ángulo de contacto  $\beta_C$  y luego el brazo del momento real  $L_N$

Usar la expresión de la invención  $M_L = M_2 \frac{L_m}{L_N}$

Estimar retroceso basado en el momento reducido  
 $M_L$  y el ángulo de contacto  $\beta_C$

Fig. 18

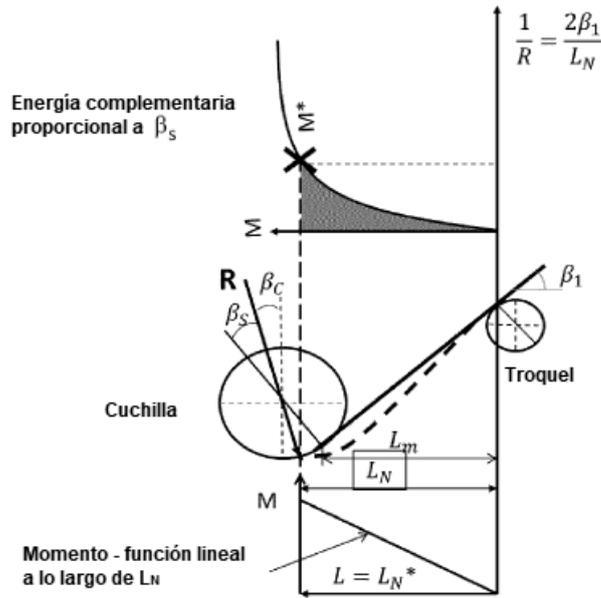
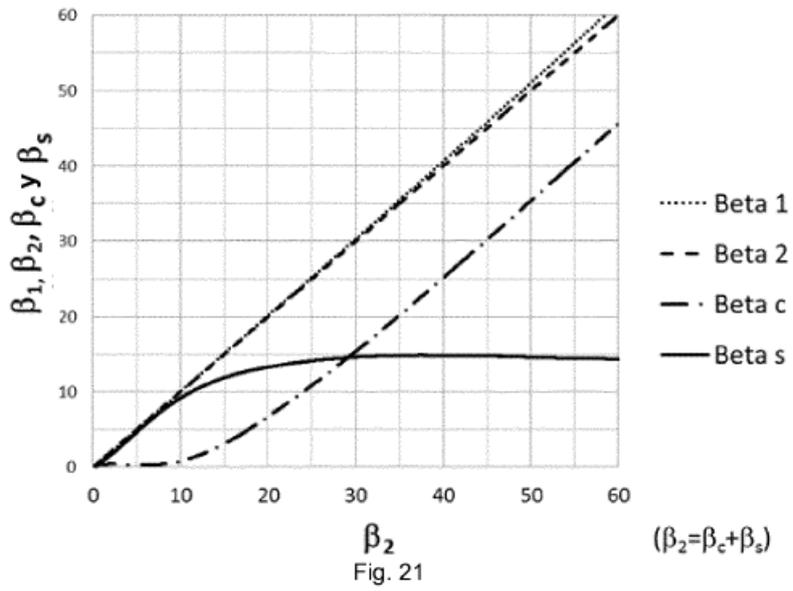
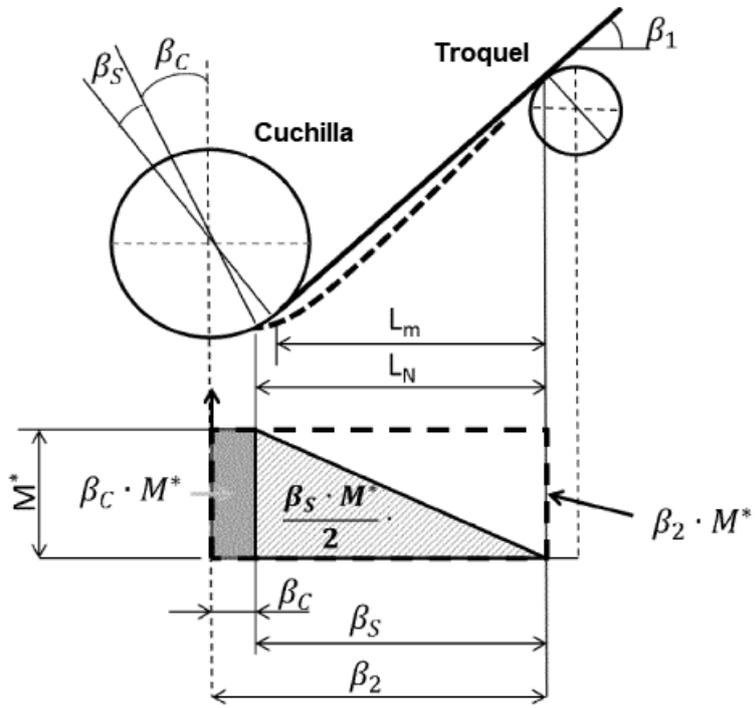


Fig. 19



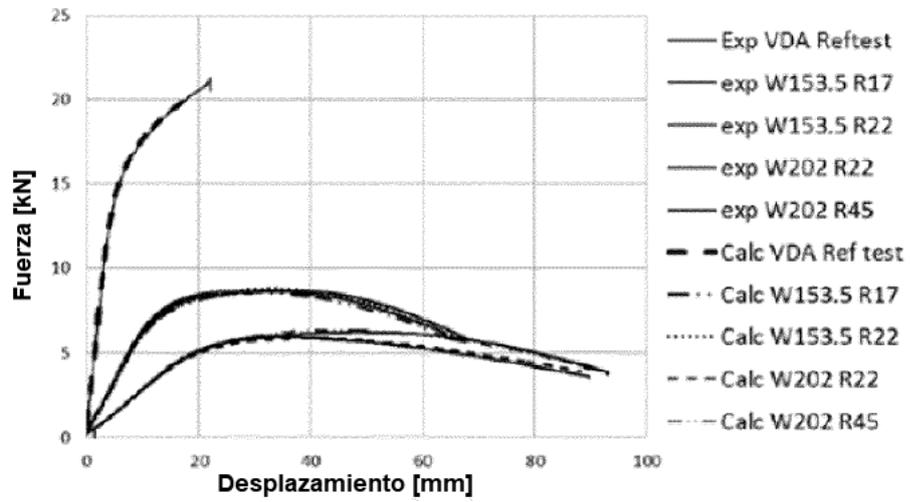


Fig. 22

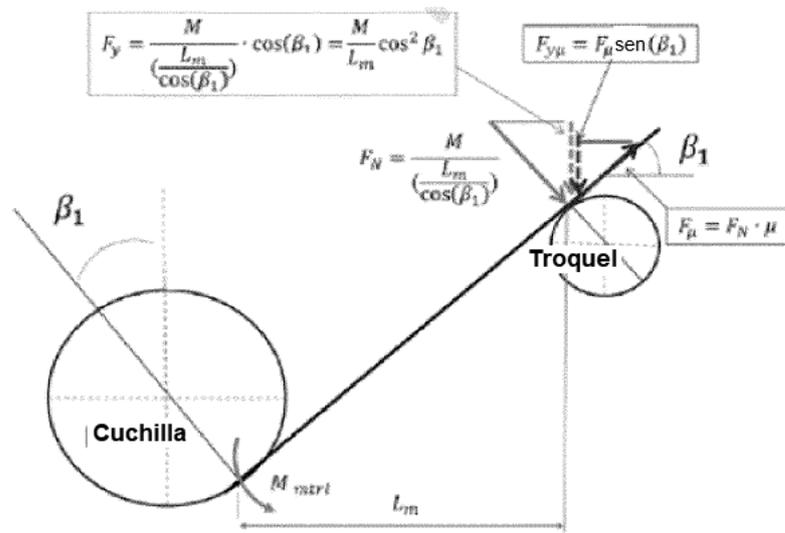


Fig. 23

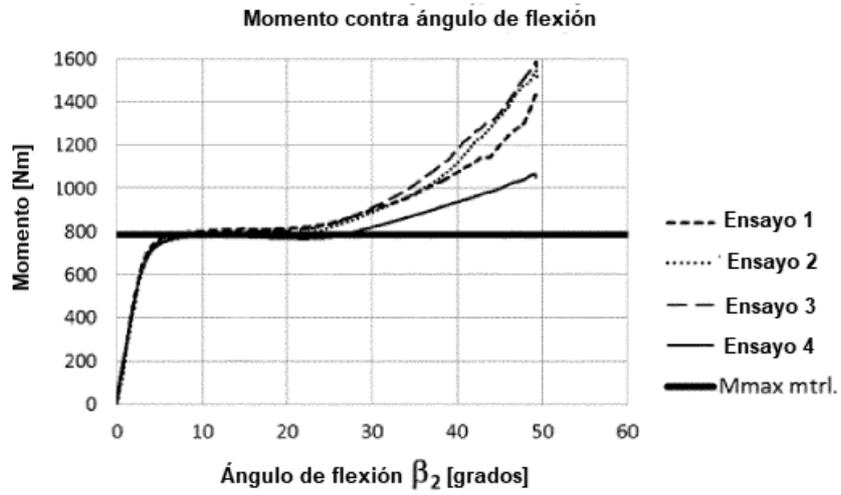


Fig. 24

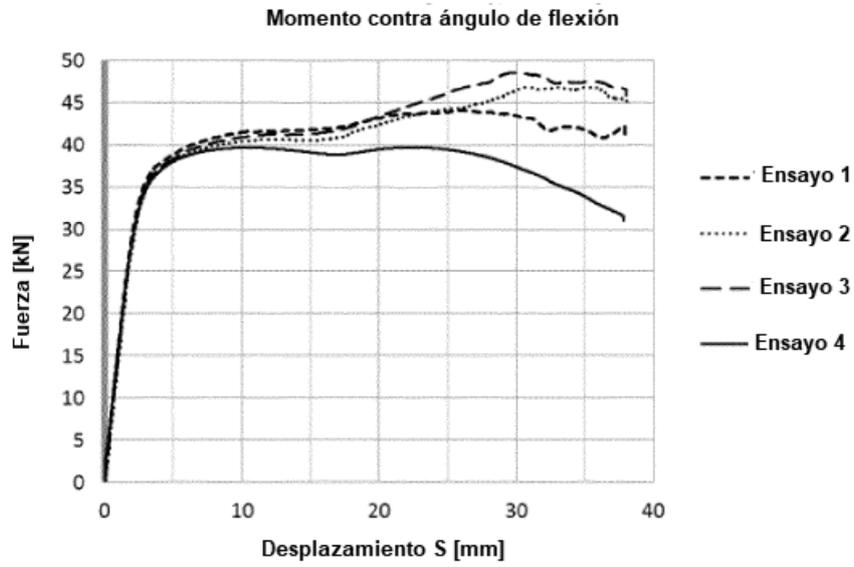


Fig. 25

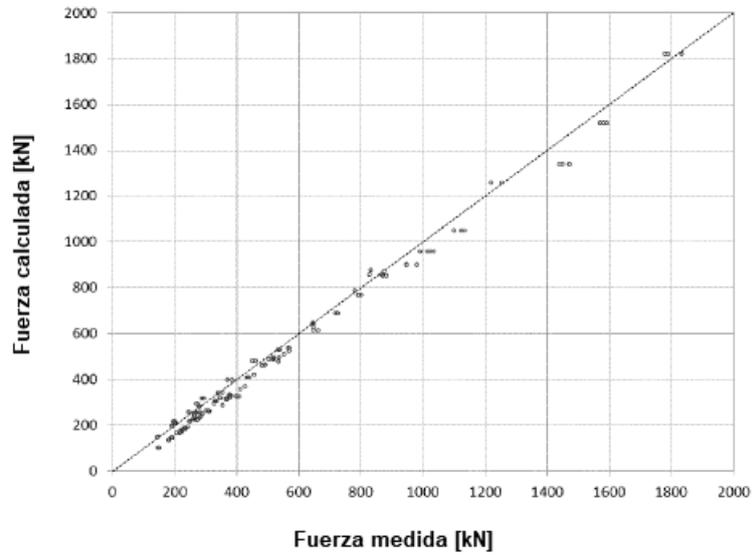


Fig. 26

Ángulo a Fmax

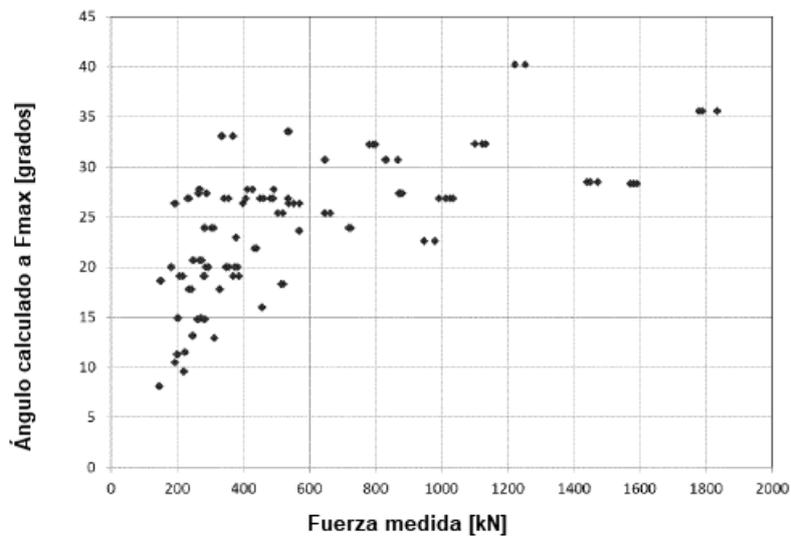
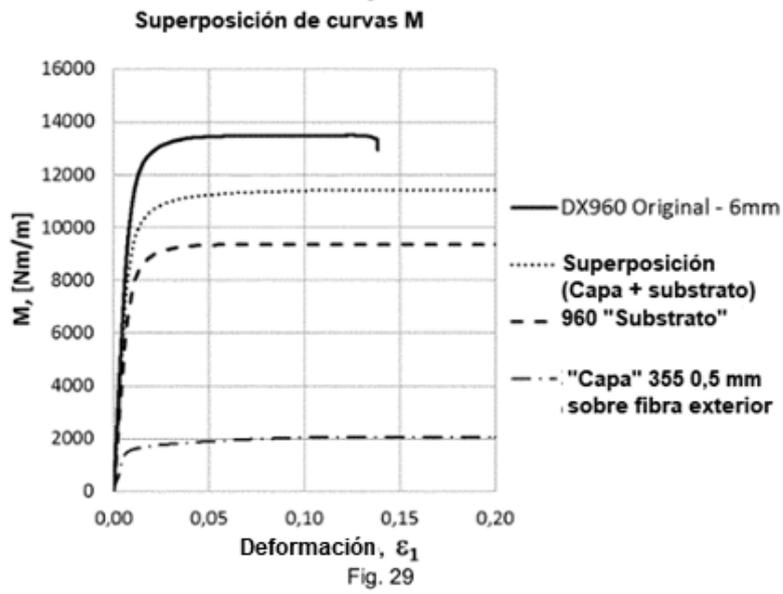
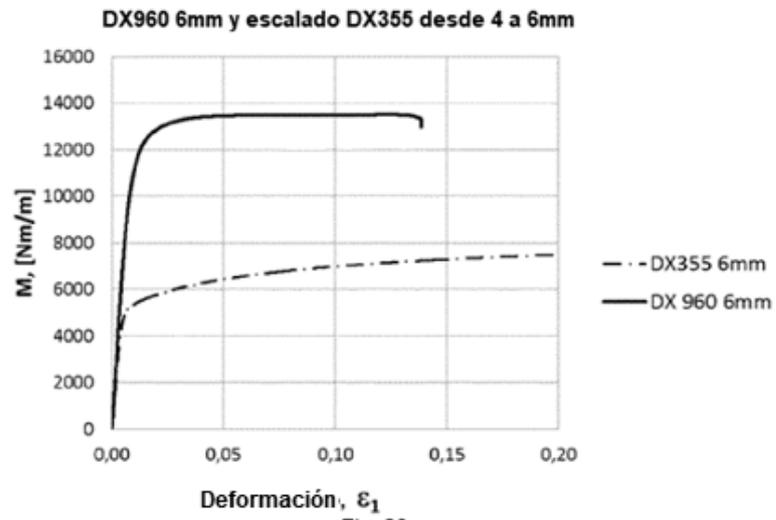


Fig. 27



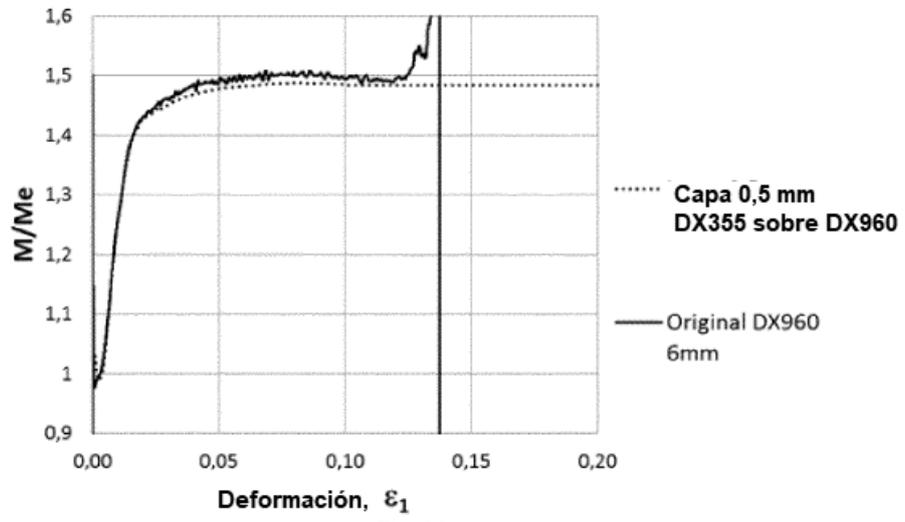


Fig. 30