

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 536 695**

51 Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.03.2012 E 12708322 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.02.2015 EP 2684146**

54 Título: **Procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta**

30 Prioridad:

10.03.2011 FR 1151964

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.05.2015

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)
25, Rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"
75015 Paris, FR y
ASSOCIATION POUR LA RECHERCHE ET LE
DÉVELOPPEMENT DES MÉTHODES ET
PROCESSUS INDUSTRIELS (50.0%)**

72 Inventor/es:

**PEIGAT, LAURENT;
BESSON, JACQUES y
REYTIER, MAGALI**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 536 695 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

Procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta

5 **Campo técnico**

La invención se refiere a un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta. Este procedimiento se aplica concretamente para todas las juntas usadas a alta temperatura, y será particularmente ventajoso para estimar la estanqueidad de juntas destinadas a usarse en un electrolizador a alta temperatura (EAT), entre una celda electroquímica y un interconector metálico del electrolizador.

Estado de la técnica anterior

Un electrolizador a alta temperatura es un sistema electroquímico destinado a producir hidrógeno a partir de una electrolisis de vapor de agua realizada a una temperatura comprendida entre aproximadamente 600°C y 1000°C. Está constituido concretamente por celdas electroquímicas, generalmente de cerámica, y por interconectores metálicos apilados. Espacios formados entre las celdas y los interconectores forman cámaras que contienen gases (hidrógeno y oxígeno) procedentes de la reacción de electrolisis. Con el fin de evitar una recombinación entre el hidrógeno y el oxígeno formados, que puede producirse cuando se mezclan estos gases, y evitar también las fugas de estos gases hacia el exterior, es necesario que estas cámaras sean estancas.

Un electrolizador de este tipo, de tipo EAT, tiene la ventaja de no inducir emisión de CO₂ y presenta un rendimiento teóricamente mejor que el de un electrolizador tradicional a baja temperatura, aportándose una parte de la energía necesaria para la electrolisis en forma de calor y no sólo en forma de electricidad.

Un objetivo de esta tecnología es realizar electrolizadores acoplados a fuentes térmicas de origen nuclear, geotérmico o incluso solar. No obstante, la gestión de los gases (vapor de agua, hidrógeno y oxígeno) y el mantenimiento de la estanqueidad a lo largo del tiempo son problemas importantes para la realización de tales electrolizadores. En efecto, las estanqueidades deben realizarse entre materiales de naturalezas diferentes (cerámica y metal) y ser eficaces a alta temperatura. Ahora bien, una celda electroquímica de cerámica es frágil y presenta un coeficiente de dilatación térmica significativamente inferior al de un interconector metálico. Por tanto, las conexiones estancas que tienen que realizarse deben realizarse con poca carga para no solicitar mecánicamente demasiado la celda electroquímica, ser suficientemente flexibles como para aguantar el diferencial de dilatación, y también presentar una buena resistencia a la fluencia para garantizar el mantenimiento de la estanqueidad a largo plazo a alta temperatura.

Las soluciones de referencia para realizar una estanqueidad de este tipo en un electrolizador EAT consisten en usar juntas a base de vidrio en estado pastoso. No obstante, el uso de este tipo de junta presenta un determinado número de inconvenientes. En efecto, aunque durante el funcionamiento nominal del electrolizador las propiedades de estas juntas están generalmente bien adaptadas, aparecen problemas durante los regímenes transitorios, es decir, durante las fases de calentamiento y enfriamiento. En efecto, una junta de vidrio es frágil por debajo de su temperatura de transición vítrea y es susceptible de romperse si se solicita a tal temperatura, concretamente a causa de las dilataciones diferenciales que aparecen entre los interconectores y las celdas electroquímicas. Una junta de este tipo crea entonces una conexión rígida entre los elementos del electrolizador, generando tensiones durante los regímenes transitorios térmicos. Además, cuando las estanqueidades se realizan mediante tales juntas, el desmontaje de los componentes de la celda es difícil, incluso imposible, sin cambiar completamente la celda. La disposición vertical de tales juntas también puede plantear problemas ya que el vidrio entonces puede fluir, reducir la vida útil del ensamblaje, y no soportar las presiones de algunos bares que reinan en un electrolizador a alta temperatura industrial. Finalmente, los vidrios usados para realizar estas juntas pueden no ser químicamente compatibles con los demás componentes de la celda y del interconector, lo que puede conllevar una corrosión importante de los asientos de juntas o incluso una contaminación con silicio de los electrodos del EAT.

Otra solución para realizar la estanqueidad entre las celdas de cerámica y los interconectores metálicos consiste en soldar el metal del interconector directamente sobre la cerámica.

No obstante, la obtención del anclaje del interconector sobre la cerámica así como las diferencias de dilatación térmica entre estos elementos hacen que esta operación sea muy difícil, concretamente cuando se realiza sobre elementos de grandes dimensiones, provocando generalmente el enfriamiento tras la solidificación de la soldadura la ruptura de la cerámica si no se introduce ninguna flexibilidad en la estructura del interconector.

También se conoce usar otros tipos de juntas de compresión a base de mica o simplemente metálicas. No obstante, tales juntas necesitan un apriete exterior que debe controlarse y mantenerse su temperatura para obtener una estanqueidad eficaz sin ruptura de la celda durante el calentamiento. Por tanto, existe una necesidad de mejorar estas juntas de compresión con vistas a mejorar la estanqueidad entres las celdas de cerámica y los interconectores metálicos de un electrolizador EAT.

En "Present calculation methods dedicated to bolted flanged connections", H. Zerres, International Journal of Pressure Vessels and Piping, volumen 81, páginas 211-216 se da a conocer un procedimiento conocido para estimar la estanqueidad de una junta en función de los parámetros de la junta.

5 **Exposición de la invención**

Un objetivo de la presente invención es proponer un procedimiento que permita estimar a priori, mediante cálculo, la estanqueidad de una junta, con el fin de poder optimizar la estructura de esta junta sin tener que medir realmente esta estanqueidad en cada modificación de la estructura de la junta.

10 Para ello, se propone un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta tal como se describe en la reivindicación 1.

15 Este procedimiento permite estimar a priori la calidad de estanqueidad de una junta y de su mantenimiento a lo largo del tiempo a partir concretamente de las características geométricas de la junta. Así, es posible desarrollar y calificar nuevas juntas, por ejemplo metálicas para un electrolizador a alta temperatura, y verificar si la estanqueidad obtenida permite obtener una fuga aceptable, por ejemplo inferior o igual a aproximadamente 10^{-3} Nml/min/mm en el caso de una junta para electrolizador a alta temperatura, sin necesidad de poner en práctica ensayos y mediciones con la junta. Este procedimiento permite concretamente proponer nuevas soluciones de estanqueidad para un electrolizador de alta temperatura estableciendo un pliego de condiciones que deberá cumplir una junta para tener una fuga lo más pequeña posible, minimizándose la fuga cuando se trata de maximizar el término F_{num} .

20 El comportamiento mecánico de la junta y de los asientos podrá identificarse con el fin de llevar a cabo las simulaciones. La junta puede tener un comportamiento viscoplastico y puede deformarse por fluencia entre los dos asientos cuyo el comportamiento puede ser elástico.

25 El término "asientos" se usa en este caso para designar los elementos entre los que está destinada a disponerse la junta. Por ejemplo, en el caso de un EAT, estos dos asientos corresponderán a una celda de cerámica y a un interconector metálico.

30 El procedimiento puede comprender además, tras la etapa de cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} , una etapa de cálculo de un caudal másico de fuga simulado Q_{mnum} de un fluido en el interior de un espacio estanqueizado mediante la junta, de tal manera que:

$$Q_{mnum} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot F_{num}} (Pe^2 - Pi^2),$$

35 con

40 M: masa molar del fluido, en kg/mol

μ : viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

R = 8,314 J/K/mol

45 T: temperatura del fluido, en K

Pi: presión en el espacio estanqueizado, en Pa

50 Pe: presión fuera del espacio estanqueizado, en Pa.

El procedimiento puede comprender además, cuando se desconocen los valores de los coeficientes λ , α y β para el material de la junta, una determinación de los valores de los coeficientes λ , α y β correspondientes al material de la junta obtenida realizando las siguientes etapas:

55 - medir un caudal másico Q_m de un fluido que permite mantener este fluido a una presión Pi sensiblemente constante en un espacio estanqueizado mediante una segunda junta que comprende dicho material durante una deformación por fluencia de la segunda junta mediante aplastamiento de la segunda junta entre dos asientos,

60 - calcular un coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} , representativo de la estanqueidad de la segunda junta en al menos una superficie de contacto entre la segunda junta y uno de los dos asientos, de tal manera que:

$$F_{exp} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot Q_m} (P_e^2 - P_i^2),$$

con

5 M: masa molar del fluido, en kg/mol

μ : viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

R = 8,314 J/K/mol

10

T: temperatura del fluido, en K

Q_m : caudal másico del fluido, en kg/s

15

P_i : presión en el espacio estanqueizado, en Pa

P_e : presión fuera del espacio estanqueizado, en Pa,

20

y, tras el cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} , una etapa de cálculo de los valores de los coeficientes λ , α y β realizada mediante minimización de la separación entre los valores de F_{num} y F_{exp} .

25

Así, cuando se desconocen los coeficientes λ , α y β para el material de la junta, se asocia una tasa de fuga de una segunda junta a base de un material similar, medida experimentalmente, con parámetros mecánicos locales (deformación plástica acumulada y tensión axial) calculados numéricamente con el fin de poder determinar estos coeficientes. Estos coeficientes podrán servir entonces para estimar a priori la calidad de estanqueidad de una junta, independientemente de su forma, y de su mantenimiento a lo largo del tiempo a partir de un diseño y de simulaciones numéricas, sin tener que realizar mediciones experimentales.

30

La etapa de cálculo de los valores de los coeficientes λ , α y β puede realizarse minimizando la separación entre F_{num} y F_{exp} , por ejemplo aplicando el método de los mínimos cuadrados.

35

El procedimiento puede comprender además, antes de la puesta en práctica de la deformación por fluencia de la segunda junta y cuando la segunda junta está compuesta por al menos un material metálico, una etapa de oxidación térmica de la segunda junta. Una oxidación térmica de este tipo permite mejorar la resistencia de la segunda junta a la fluencia y facilitar el desmontaje de la segunda junta tras la deformación al formar una capa de alúmina alrededor de la segunda junta.

La etapa de medición del caudal másico Q_m puede obtenerse realizando:

40

- una primera etapa de aumento de la temperatura de la segunda junta y de los asientos,

- una segunda etapa de puesta en contacto y de puesta a presión de los asientos contra la segunda junta,

45

- una tercera etapa de mantenimiento de la presión ejercida por los asientos contra la segunda junta,

- una cuarta etapa de reducción de la presión ejercida por los asientos contra la segunda junta,

- una quinta etapa de separación de al menos uno de los asientos y de la segunda junta.

50

La primera etapa de aumento de la temperatura puede ponerse en práctica hasta alcanzar una temperatura comprendida entre aproximadamente 600°C y 1000°C, y/o la presión ejercida por los asientos sobre la segunda junta durante la tercera etapa puede corresponder a un esfuerzo ejercido por al menos uno de los asientos sobre la segunda junta comprendido entre aproximadamente 3 N/mm y 10 N/mm, y/o la tercera etapa de mantenimiento de la presión ejercida por los asientos sobre la segunda junta puede ponerse en práctica durante un periodo comprendido entre aproximadamente 5 horas y 15 horas.

55

Durante la deformación por fluencia de la segunda junta, puede disponerse una primera cara de la segunda junta contra uno de los asientos que constituye un soporte, aplicándose la presión entre un resalte y la junta mediante el otro asiento en contacto con una segunda cara, opuesta a la primera cara, de la junta, siendo al menos uno de los asientos móvil.

60

La etapa de simulación numérica puede ponerse en práctica por medio de un software de cálculo mecánico

mediante elementos finitos.

5 El procedimiento puede comprender además, antes de la etapa de simulación numérica, una etapa de medición mediante perfilometría láser del perfil de la junta y/o de los asientos, realizándose un mallado numérico de la junta y/o de los asientos, usado durante la etapa de simulación numérica, a partir del perfil medido de la junta y/o de los asientos. Así, es posible modelar en malla la geometría lo más cerca posible de la realidad controlando la misma mediante perfilometría láser.

10 La deformación plástica acumulada p y la tensión axial $Smzz$ pueden calcularse durante la simulación numérica en puntos de Gauss de elementos de un mallado numérico de la junta y de los asientos, promediándose los valores calculados de la deformación plástica acumulada p y de la tensión axial $Smzz$ y llevándose a nodos de la junta.

15 La longitud de contacto Lc puede obtenerse calculando, mediante extrapolación polinómica de la tensión axial $Smzz$ expresada en función de una posición a nivel de dicha superficie de contacto entre la junta y dicho uno de los dos asientos, correspondiendo los valores de dos abscisas al valor máximo dividido entre 10 de la tensión axial máxima $Smzz$, correspondiendo la longitud de contacto Lc a la diferencia entre dichos valores de las dos abscisas.

20 La deformación plástica acumulada y la tensión axial pueden calcularse a lo largo del contacto entre la junta y al menos uno de los dos asientos.

La invención también se refiere a un dispositivo de estimación de la estanqueidad de una junta, que comprende medios adecuados para poner en práctica un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta tal como se definió anteriormente.

25 También se propone un dispositivo de estimación de la estanqueidad de una junta, que comprende al menos:

- medios de simulación numérica de una deformación por fluencia de la junta mediante aplastamiento de la junta entre dos asientos,

30 - medios de cálculo, en al menos una superficie de contacto entre la junta y uno de los dos asientos, de una deformación plástica acumulada p de la junta, de una tensión axial $Smzz$ entre la junta y dicho uno de los dos asientos, y de una longitud de contacto Lc entre la junta y dicho uno de los dos asientos, durante la simulación numérica,

35 - medios de cálculo de un coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} , representativo de la estanqueidad de la junta en dicha superficie de contacto entre la junta y dicho uno de los dos asientos, de tal manera que:

$$F_{num} = \int_{ri}^{re} \int_p \lambda \cdot \left(\frac{Smzz}{\sigma_{umbral}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta dp \frac{dr}{r},$$

40 con

λ , α y β : coeficientes cuyos valores dependen del material de la junta

45 $Lc = re - ri$, en m

$Smzz$: tensión axial, en MPa

σ_{umbral} : tensión umbral igual a 1 MPa

50 p : deformación plástica acumulada

p_0 : constante igual a 1.

55 El dispositivo puede comprender además medios de cálculo de un caudal másico de fuga simulado Q_{mnum} de un fluido en el interior de un espacio estanqueizado mediante la junta, de tal manera que:

$$Q_{num} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot F_{num}} (Pe^2 - Pi^2),$$

con

5 M: masa molar del fluido, en kg/mol

μ : viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

R = 8,314 J/K/mol

10

T: temperatura del fluido, en K

Pi: presión en el espacio estanqueizado, en Pa

15 Pe: presión fuera del espacio estanqueizado, en Pa.

El dispositivo puede comprender además, cuando se desconocen los valores de los coeficientes λ , α y β para el material de la junta, medios de determinación de los valores de los coeficientes λ , α y β del material de la junta que comprenden:

20

- medios de deformación por fluencia mediante aplastamiento de una segunda junta entre dos asientos,

25

- medios de medición de un caudal másico Q_m de un fluido que permite mantener este fluido a una presión Pi sensiblemente constante en un espacio estanqueizado mediante una segunda junta que comprende dicho material durante una deformación por fluencia de la segunda junta mediante aplastamiento de la segunda junta entre dos asientos,

30

- medios de cálculo de un coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} , representativo de la estanqueidad de la segunda junta en al menos una superficie de contacto entre la segunda junta y uno de los dos asientos, de tal manera que:

$$F_{exp} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot Q_m} (Pe^2 - Pi^2),$$

con

35

M: masa molar del fluido, en kg/mol

μ : viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

40

R = 8,314 J/K/mol

T: temperatura del fluido, en K

45

Q_m : caudal másico del fluido, en kg/s

Pi: presión en el espacio estanqueizado, en Pa

Pe: presión fuera del espacio estanqueizado, en Pa,

50

- medios de cálculo de los valores de los coeficientes λ , α y β adecuados para minimizar la separación entre los valores de los coeficientes F_{num} y F_{exp} .

El dispositivo puede comprender además medios de simulación numérica mediante elementos finitos de la junta y de los asientos, que comprenden por ejemplo un software de cálculo mecánico mediante elementos finitos.

55

La invención también se refiere a un producto de programa informático que tiene en memoria un código ejecutable para la puesta en práctica de un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta tal como se describió anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

- 5 La presente invención se comprenderá mejor tras la lectura de la descripción de ejemplos de realización facilitados a título puramente indicativo y en absoluto limitativo haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:
- 10 - la figura 1 representa un dispositivo de medición de una fuga desde un espacio estanqueizado mediante una junta, que puede usarse durante un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 15 - la figura 2 es una vista en sección de una junta dispuesta entre dos asientos de un dispositivo de medición de fuga que puede usarse durante un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 20 - la figura 3 representa los perfiles de diferentes resaltes que pueden usarse durante un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 25 - las figuras 4 a 10 representan tasas de fuga medidas durante una deformación por fluencia de una junta mediante los diferentes resaltes representados en la figura 3 y para diferentes esfuerzos aplicados sobre la junta durante la deformación,
 - 30 - la figura 11 representa un mallado numérico de una junta y de dos asientos realizado durante un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 35 - las figuras 12 y 13 representan la distribución de la tensión axial y de la deformación plástica acumulada calculadas durante la simulación numérica realizada durante un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 40 - la figura 14 representa la tensión axial calculada durante la simulación numérica de un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular,
 - 45 - las figuras 15 a 18 representan tasas de fuga medidas durante una deformación por fluencia de una junta mediante los diferentes resaltes representados en la figura 3 y para diferentes esfuerzos aplicados sobre la junta durante la deformación, en función de la deformación plástica acumulada media y de la longitud de contacto calculadas,
 - 50 - la figura 19 representa valores de F_{num} y F_{exp} obtenidos durante la puesta en práctica de un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención,
 - 55 - la figura 20 representa un dispositivo de estimación de la estanqueidad de una junta, también objeto de la presente invención, que comprende medios adecuados para poner en práctica un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta, objeto de la presente invención, según un modo de realización particular.
- Partes idénticas, similares o equivalentes de las diferentes figuras descritas a continuación llevan los mismos números de referencia de manera que se facilite el paso de una figura a otra.
- Las diferentes partes representadas en las figuras no están representadas necesariamente según una escala uniforme, para hacer que las figuras sean más comprensibles.
- 50 Debe entenderse que las diferentes posibilidades (variantes y modos de realización) no son excluyentes unas de otras y pueden combinarse entre sí.

Descripción detallada de modos de realización particulares

- 55 Los fugas que se trata de reducir en el interior de un electrolizador EAT, que corresponden a un flujo de gases desde el interior del espacio estanqueizado de la junta hacia el exterior de este espacio, corresponden a flujos de un fluido a través de las porosidades. Estas porosidades, presentes en la superficie de contacto entre la junta y la celda electroquímica y/o entre la junta y el interconector metálico del electrolizador EAT, están formadas por rugosidades presentes en la superficie de contacto de estos elementos.
- 60 El número de Reynolds Re es un número adimensional que caracteriza el flujo de un fluido, en particular la naturaleza de su régimen (laminar, transitorio o turbulento), y que representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas de ese flujo. Este número de Reynolds Re se define mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho SL}{\mu} = \frac{SL}{\nu} \quad (1)$$

con

5 ρ : densidad del fluido, en kg/m^3

S: velocidad del fluido, en m/s

L: longitud característica, en m

10

M: viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

: viscosidad cinemática del fluido, en m^2/s .

15 En las condiciones que se encuentran en el electrolizador, a saber, que el fluido considerado es aire, que la temperatura es igual a aproximadamente 800°C y que la presión es igual a aproximadamente 1,2 bar, y tomando una velocidad de fluido de 1 m/s y una longitud de contacto de $1 \cdot 10^{-4}$ m, el número de Reynolds Re es igual a 0,763, lo que corresponde a un flujo de tipo laminar.

20 Para este tipo de flujo, en condiciones estacionarias (siendo las variables independientes del tiempo), el flujo de un fluido a través de un medio poroso se describe mediante la ley de Darcy.

En el caso de un flujo radial, la ley de Darcy para un gas es:

$$Q_m = \frac{A\rho k}{\mu} \frac{dP}{dr} \quad (2)$$

25

con

Q_m : caudal másico, en kg/s

30

A: superficie de la sección de paso, en m^2

ρ : densidad, en kg/m^3

35

k: permeabilidad intrínseca del medio poroso, en m^2

μ : viscosidad dinámica, en Pa.s

$$\frac{dP}{dr}$$

: gradiente de presión radial, en Pa/m.

40

Cuando el fluido es compresible, lo que es el caso del aire, se aplica la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT = \frac{mRT}{M} \quad (3)$$

45

con

P: presión, en Pa

V: volumen del fluido, en m^3

50

N: cantidad de materia, en mol

R: constante de los gases ideales ($R = 8,314 \text{ J/K/mol}$)

T: temperatura del fluido, en K

5 m: masa del fluido, en kg

M: masa molar, en kg/mol.

10 Se obtiene, por tanto:

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (4)$$

15 A partir de las ecuaciones (2) y (4) anteriores, es posible escribir la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_m RT \rho}{MP} = \frac{A \rho k}{\mu} \frac{dP}{dr} \quad (5)$$

Ahora bien, la superficie A puede escribirse como:

$$20 \quad A = 2\pi r h \quad (6)$$

Con

r: radio del poro, en m

25 h: altura característica, en m.

A partir de las ecuaciones (5) y (6) anteriores, es posible escribir por tanto:

$$30 \quad Q_m \frac{dr}{r} = \frac{2\pi M}{\mu RT} h k P dP \quad (7)$$

$$\frac{2\pi M}{\mu RT} = \delta$$

El término $\frac{2\pi M}{\mu RT}$ es independiente de la presión. El término hk depende de r puesto que varía según la longitud de contacto, y se indicará como $\kappa(r)$ en lo sucesivo.

35 Para determinar el caudal másico de fuga entre el interior y el exterior del espacio estanqueizado mediante la junta a nivel de una superficie de contacto con la junta, se integra la ecuación (7) teniendo en cuenta las condiciones límite de estos dos medios:

$$40 \quad Q_m \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{\kappa(r)r} = \delta \int_{P_i}^{P_e} P dP \quad (8)$$

O también:

$$45 \quad Q_m \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{\kappa(r)r} = \frac{\delta}{2} (P_e^2 - P_i^2) \quad (9)$$

con

r_e y r_i : radios exterior e interior de la deformación de la junta, en m (y con $r_e - r_i =$ longitud de contacto).

P_e y P_i : presiones interior y exterior del espacio estancaizado mediante la junta, en Pa.

5 El caudal de fuga radial analítico según la ley de Darcy se expresa entonces en función de una diferencia de los cuadrados de las presiones entre dos medios, de parámetros geométricos del dispositivo considerado así como de parámetros relacionados con el fluido estudiado.

10 La ecuación (9) anterior también puede escribirse en la forma:

$$\int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{\kappa(r)r} = \frac{\delta}{2Q_m} (P_e^2 - P_i^2) \quad (10)$$

15 Cuanto más permeable es el medio, más fácilmente puede fluir el fluido y más importante es la fuga. Asimismo, cuanto más importante sea la altura de los poros (o huecos), más lo será también la fuga.

En la ecuación (10) anterior, el término $\kappa(r)$ contiene los términos de permeabilidad y de altura de poro que favorecen

la fuga. Por consiguiente, cuando el término $\frac{1}{\kappa(r)}$ aumenta, eso significa que disminuye la fuga y que las porosidades que facilitan el paso del fluido se obstruyen poco a poco. La ecuación (10) corresponde entonces a un
20 coeficiente de obstrucción de porosidades a nivel de la superficie de contacto con la junta y se indicará como F_{exp} de tal manera que:

$$F_{exp} = \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{\kappa(r)r} = \frac{\delta}{2Q_m} (P_e^2 - P_i^2) \quad (11)$$

25 Se describe a continuación un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta destinada a usarse por ejemplo en un electrolizador de tipo EAT, entre una celda electroquímica y un interconector metálico de este electrolizador.

30 Para poder determinar un coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} representativo de la estanqueidad de la junta que se trata de estimar, es necesario conocer coeficientes λ , α y β propios del material de la junta. En el ejemplo descrito en este caso, se desconocen estos coeficientes. Para determinar estos coeficientes, se realiza previamente al cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} una medición experimental de la tasa de fuga de una segunda junta 10, compuesta por el mismo material que el de la junta de la que se trata de caracterizar la estanqueidad, correspondiendo esta tasa de fuga al caudal másico Q_m de un fluido
35 que se escapa desde el interior de un volumen estancaizado mediante la segunda junta hacia el exterior de este volumen, a través de las porosidades formadas por las rugosidades en las superficies de contacto de la segunda junta 10.

40 A partir de esta tasa de fuga medida, será posible calcular un coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} . Este coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} se usará entonces para determinar coeficientes λ , α y β propios del material de la junta que podrán servir a continuación para estimar a priori, es decir mediante cálculo, sin tener que realizar mediciones experimentales de la tasa de fuga, la estanqueidad de cualquier junta compuesta por el mismo material que el de la segunda junta 10, a partir de un cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} .

45 La junta de la que trata de estimarse mediante cálculo la estanqueidad puede tener cualquier forma. Puede presentar concretamente partes sobresalientes, o resaltes, que contribuyen a realizar la estanqueidad concretamente cuando las partes entre las que la junta está destinada a realizar la estanqueidad (correspondiendo estas partes, por ejemplo, a una celda electroquímica y a un interconector metálico de un electrolizador EAT)
50 presentan superficies destinadas a estar en contacto con la junta relativamente planas. La segunda junta 10 usada durante la fase de medición experimental del procedimiento puede tener por tanto una forma similar o no a la de la junta de la que se trata de caracterizar la estanqueidad.

55 Las mediciones se realizan mediante un dispositivo 100 de medición, representado en la figura 1, que permite medir una fuga desde el espacio estancaizado mediante la segunda junta 10 en función de un esfuerzo lineal aplicado

sobre la segunda junta 10 y del aplastamiento de la misma.

El dispositivo 100 de medición comprende un asiento 102 inferior que sirve de soporte sobre el que está destinada a descansar la segunda junta 10. Esta asiento 102 inferior puede comprender un resalte 104 destinado a deformar la segunda junta 10 por fluencia cuando ésta se presiona contra este resalte 104. El dispositivo 100 comprende también un asiento 106 superior destinado a presionar la segunda junta 10 contra el resalte 104 con el fin de que este último deforme por fluencia la segunda junta 10.

La figura 2 representa una vista en corte de la segunda junta 10 dispuesta entre los dos asientos 102 y 106, así como el perfil del resalte 104. Observado desde arriba, es decir en el plano (X, Y) según los ejes X, Y y Z representados en la figura 2, el resalte 104 es de forma sensiblemente circular, correspondiendo el espacio estancado mediante la segunda junta 10 al espacio en el interior del círculo delimitado por el resalte 104, entre la segunda junta 10 y el asiento 102 inferior.

El dispositivo 100 de medición está asociado en este caso a un horno de aire que permite efectuar las mediciones hasta una temperatura igual a aproximadamente 1000°C.

La tasa de fuga medida corresponde al caudal de gas, por ejemplo aire, necesario para el mantenimiento de una sobrepresión, sensiblemente constante y por ejemplo igual a aproximadamente 200 mbar, en la zona estancada mediante la segunda junta 10. El fluido sale por un orificio 105 formado a través del asiento 102 inferior a nivel del espacio destinado a estancarse. El dispositivo 100 comprende medios de regulación del caudal del fluido que permiten mantener esta sobrepresión sensiblemente constante. La fuga se produce a través de las porosidades formadas por las rugosidades de la segunda junta 10 y las del resalte 104, rugosidades que forman un medio poroso cuya configuración varía a lo largo del tiempo, rellenando la segunda junta 10 algunas de estas rugosidades durante su fluencia.

El dispositivo 100 permite controlar la presión en el interior del espacio estancado, el aplastamiento de la junta y el esfuerzo aplicado sobre la junta durante el ensayo.

La segunda junta 10 es, por ejemplo, un fleje compuesto por Fecralloy (aleación compuesta por hierro, cromo y aluminio). La junta de la que se trata de estimar mediante cálculo la estanqueidad también está compuesta por Fecralloy. En una variante, la junta de la que se trata de estimar mediante cálculo la estanqueidad, así como la segunda junta 10, podrían estar compuestas por plata.

Los asientos 102 y 106 comprenden, por ejemplo, una aleación a base de níquel, por ejemplo de tipo Udimet 720. En el EAT, la junta está destinada, por ejemplo, a disponerse entre elementos compuestos por acero de tipo Crofer, Udimet, aleación de tipo Haynes 230 o incluso zircona.

Con el fin de ilustrar los cálculos realizados, en lo sucesivo a lo largo del procedimiento, las mediciones van a realizarse deformando por fluencia varias juntas a partir de diferentes resaltes y con diferentes esfuerzos aplicados sobre las juntas.

La figura 3 representa los perfiles de diferentes resaltes 104.1, 104.2, 104.3 y 104.4 usados para realizar una deformación por fluencia de varias segundas juntas 10. Estos perfiles se miden en este caso de manera precisa mediante perfilometría láser.

Las segundas juntas 10 en primer lugar se preoxidan durante un tratamiento térmico de aproximadamente 30 h a aproximadamente 900°C con el fin de mejorar su resistencia a la fluencia y de facilitar el desmontaje tras la deformación al formar una capa de alúmina alrededor de la junta.

El procedimiento experimental de deformación por fluencia de las juntas en el dispositivo 100 de medición se pone en práctica a continuación. Para ello, una de las segundas juntas 10 se deposita en el recinto del horno del dispositivo 100, entre los asientos 102 y 106, después se aumenta la temperatura hasta aproximadamente 800°C con una rampa de aproximadamente 5°C/min.

Una vez alcanzada esta temperatura, el asiento 106 superior se pone en contacto con la segunda junta 10, después se conduce aire al interior del circuito de gas. La secuencia de apriete destinada a deformar la segunda junta por fluencia comienza a continuación. El esfuerzo, correspondiente a la fuerza ejercida por el asiento 106 superior sobre la segunda junta 10, aumenta hasta un valor objetivo durante aproximadamente 50 segundos.

Este esfuerzo se mantiene a continuación durante aproximadamente 10 h, después se reduce hasta volver a ser nulo durante aproximadamente 50 segundos. Se efectuaron varios ensayos con los diferentes resaltes 104.1 a 104.4, con esfuerzos iguales a 3,5 y 10 N/mm. La fuga, el aplastamiento de la junta y el esfuerzo se siguen y se miden a lo largo de la totalidad de las diferentes fases de la deformación.

Los valores de los esfuerzos aplicados sobre la segunda junta son una función de la aplicación prevista y de los

intervalos de fuga estudiados. Así, para juntas destinadas a realizar una estanqueidad en el interior de un electrolizador EAT con baja carga, son pertinentes esfuerzos que van de 3 a 10 N/mm para obtener un tasa de fuga correspondiente a aproximadamente el 1% del hidrógeno producido, es decir, de aproximadamente 10^{-3} Nml/min/mm. El porcentaje de error con respecto a la tasa de fuga medida es inferior a aproximadamente el 10%.

Las curvas 110.1 a 110.4 representadas en la figura 4 corresponden a las tasas de fuga medidas durante las diferentes fases de la deformación de la segunda junta 10 por los diferentes resaltes 104.1 a 104.4, para un esfuerzo igual a aproximadamente 3 N/mm. Asimismo, las curvas 112.1 a 112.4 y 114.1 a 114.4 representadas en las figuras 5 y 6 corresponden a las tasas de fuga medidas durante las diferentes fases de la deformación de la junta 10 por los diferentes resaltes 104.1 a 104.4, para un esfuerzo respectivamente igual a aproximadamente 5 N/mm y 10 N/mm.

Se desprende de estas curvas que cuanto más agudo es el resalte, más baja es la tasa de fuga. En efecto, cuanto más fino es el resalte, más localizado está el esfuerzo aplicado y más va a deformarse entonces la junta. Al deformarse, la junta rellena las rugosidades presentes en la superficie de contacto entre la junta y el resalte, alargando así el camino de fuga del gas que tiene entonces más dificultad para escaparse.

Estas mediciones de la tasa de fuga también se notifican en las figuras 7 a 10, agrupándose esta vez las curvas en función del resalte usado.

Así, en la figura 7, las curvas 110.1, 112.1 y 114.1 anteriormente representadas en las figuras 4 a 6 se agrupan en una misma gráfica con el fin de comparar la influencia del esfuerzo para un mismo resalte.

A partir de estas figuras 7 a 10, se observa que, sea cual sea el resalte usado, la tasa de fuga disminuye cuando aumenta el esfuerzo. Así, cuanto más importante sea el esfuerzo transmitido a la junta, más va a fluir y menos facilidad tendrá para escaparse el gas.

Es posible controlar que el esfuerzo se haya distribuido bien por toda la junta midiendo mediante perfilometría láser en diferentes zonas el perfil de la segunda junta 10 que ha experimentado la deformación. También es posible comparar esta deformación experimental con la calculada posteriormente.

Esta fase de medición experimental de la tasa de fuga sólo se pone en práctica si se desea determinar los coeficientes λ , α y β propios del material de la junta de la que se trata de estimar la estanqueidad. Si se conocen estos coeficientes, no es necesario realizar estas mediciones, pudiendo estimarse la estanqueidad mediante cálculo, sin medición, tal como se describe a continuación.

Se describe ahora la fase de simulación y de cálculo que permite, cuando se desconocen los coeficientes λ , α y β propios del material de la junta, determinar estos coeficientes usando concretamente la medición del coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} anteriormente realizada.

Se realiza en primer lugar un mallado numérico que representa una junta 9 de la que trata de evaluarse la estanqueidad, y elementos 103 y 107 entre los que está destinada a disponerse la junta 9. Los elementos 103 y 107 corresponden, por ejemplo, a una celda electroquímica y un interconector metálico de un electrolizador EAT entre los que la junta 9 está destinada a garantizar la estanqueidad. Por analogía con la medición anteriormente realizada, los elementos 103 y 107 se denominarán en lo sucesivo "asientos". En la figura 11 se representa el mallado numérico de la junta 9 y de los asientos 103, 107. Con el fin de facilitar la comprensión de la invención, la geometría (perfil) de la junta 9 es en este caso similar a la de la segunda junta 10. Las geometrías (perfiles) de los asientos 103 y 107 también son análogas a las de los asientos 102 y 104, excepto porque en el ejemplo descrito en este caso se supone que es el asiento 103 superior el que comprende un resalte 105 (de perfil similar al resalte 104) destinado a aplastar la junta 9.

Se simula numéricamente una deformación por fluencia de la junta 9, y se determinan a continuación los campos mecánicos locales de la junta, accesibles mediante esta simulación numérica de la deformación por fluencia. En efecto, por analogía con las leyes de daño según las cuales las tensiones y la deformación por acumulación de daños hacen aparecer huecos, o porosidades, en el material que conducen a su rotura, la tasa de fuga que se trata de estimar en este caso está relacionada con la aparición o con la obstrucción de huecos en el medio poroso, a saber, en las superficies de contacto entre la junta 9 y los asientos 103 y 107. Por tanto, se trata de expresar esta tasa de fuga en función de los parámetros mecánicos pertinentes que contribuyen a la obstrucción de las porosidades con el fin de estimar teóricamente y a priori el caudal de fuga de una junta dada en función de determinados parámetros que van a determinarse numéricamente.

La simulación numérica de la deformación por fluencia de la junta de estanqueidad 9 se realiza por ordenador, en este caso por medio de un software de cálculo mecánico mediante elementos finitos, que puede calcular los campos mecánicos locales durante una deformación por fluencia, por ejemplo el software Cast3M.

Los campos mecánicos tenidos en cuenta en este caso son la tensión axial, indicada como $Smzz$ y correspondiente

a la tensión según el eje Z representado en la figura 2, y la deformación plástica acumulada indicada como p. El cálculo se efectúa, por ejemplo, en 2D axisimétricas. Los diferentes elementos se modelan usando, por ejemplo, elementos de tipo cuadrángulo con interpolación cuadrática y con integración reducida (8 nodos y 4 puntos de Gauss para cada cuadrángulo). En el presente caso, el modelado de la junta 9, de los asientos 103, 107 y del resalte 105 se realiza con 12800 elementos y 38000 nodos en el modelo. Los asientos 103, 107 se modelan confiriéndoles las propiedades de Udimet 720, es decir un comportamiento elástico a 800°C. La junta 9 de Fecralloy tiene un comportamiento elastoviscoplastico a 800°C según una ley de tipo potencia tal como:

$$\dot{\epsilon} = de_0 \left(\sinh \left(\frac{\sigma - \sigma_{\text{umbral}}}{\sigma_0} \right) \right)^b \quad (12)$$

10 con

ϵ : velocidad de deformación

15 de_0 : constante igual a $0,51 \text{ s}^{-1}$

σ : tensión, en MPa

20 σ_{umbral} : tensión umbral que equivale a 1 MPa

σ_0 : constante que equivale a 221,75 MPa

b: constante que equivale a 4,58.

25 El modelado de la junta 9 se realiza por tanto confiriéndole un comportamiento de ese tipo.

El modelado del resalte 105 puede realizarse a partir del perfil real del resalte medido mediante perfilometría láser, que se alisa a continuación mediante un polinomio cuyos coeficientes se introducen como parámetros en el archivo de implementación de datos del software Cast3M. Por tanto, es posible modificar el perfil del resalte modelado modificando únicamente estos coeficientes, generándose a continuación el mallado automáticamente por el software. En el ejemplo descrito en este caso, el resalte 105 modelado comprende un perfil correspondiente al perfil 104.3 representado en la figura 3.

35 En la simulación, el contacto se gestiona a ambos lados de la junta, es decir a la vez en el lado del asiento inferior y en el lado del asiento superior, y se aplica un coeficiente de rozamiento igual a 0,2.

40 En la figura 11 se representa el modelado de los diferentes elementos 9, 103, 105 y 107 realizado en este caso. El modelo se bloquea en la dirección R (dirección paralela al plano principal de la junta 9) y el asiento 102 inferior se bloquea en la dirección Z, es decir se considera como fijo en la dirección perpendicular al plano principal de la junta 9. La presión se aplica uniformemente sobre la parte superior del asiento 103 superior. La simulación se realiza considerando que la junta 9 se presiona entre los asientos 103 y 107 durante un periodo prolongado, por ejemplo varios años.

45 Durante la simulación, los campos mecánicos se estudian tras la carga, después de 20 min, 40 min, y después cada hora hasta el final de la carga.

Las figuras 12 y 13 representan la distribución de la tensión axial (S_{mzz}) y de la deformación plástica acumulada (p) en los elementos modelados, calculadas tras un mantenimiento de la presión durante 10 horas.

50 Al producirse la fuga entre la junta 9 y el asiento 103 que comprende el resalte 105, los campos mecánicos (tensión axial y deformación plástica acumulada) que intervienen en el contacto entre estas dos partes son los más pertinentes ya que son los más susceptibles de tener una influencia sobre el nivel de estanqueidad medido. En un instante t se calculan estas magnitudes en los puntos de Gauss de los elementos modelados. Para cada incremento de tiempo, se promedia el valor de estos parámetros en el elemento. Estos valores se llevan a continuación a los 55 nodos para el procesamiento posterior.

60 Como variante, cuando la fuga se produce entre la junta 9 y los dos asientos 103 y 107, se consideran los campos mecánicos locales a nivel de las dos superficies de contacto entre la junta y estos asientos. Si la geometría de estos elementos es simétrica (por ejemplo, cuando los asientos no presentan ningún resalte y el perfil de la junta es igual a nivel de estas dos superficies de contacto), será posible considerar que la fuga será similar a nivel de estas dos superficies de contacto y sólo calcular los campos mecánicos a nivel de una única superficie de contacto.

Uno de los parámetros importantes que tienen una influencia sobre el caudal de fuga es la longitud de contacto entre

el resalte 105 y la junta 9. Ésta se determina basándose en la tensión axial calculada entre la junta 9 y el resalte 105: cuando la tensión es nula, esto significa que el resalte 105 y la junta 9 no se tocan, y a la inversa si la tensión axial es no nula. La figura 14 representa gráficamente esta tensión axial durante la deformación por fluencia simulada de la junta 9, en la superficie de contacto entre la junta 9 y el resalte 105. Se observa en esta figura 14 que la tensión axial presenta un perfil que comprende dos picos, o máximos, 116.1 y 116.2 diferenciados. Un método analítico para determinar la longitud de contacto consiste en seleccionar el valor máximo de la tensión axial $Sm_{zz_{max}}$. Esta tensión axial máxima $Sm_{zz_{max}}$ se divide entonces entre 10. El valor obtenido se extrapola a continuación de manera polinómica con el fin de hallar las dos abscisas correspondientes. La longitud de contacto L_c corresponde entonces a la diferencia entre las dos abscisas obtenidas. Como variante, también es posible considerar que la longitud de contacto corresponde a la distancia en la que la tensión axial es no nula.

Los campos mecánicos tenidos en cuenta en este caso para determinar mediante cálculo la tasa de fuga de la junta 9 son la tensión axial Sm_{zz} y la deformación plástica acumulada p .

En efecto, las curvas 118.1 a 118.3 y 120.1 a 120.3 de las figuras 15 y 16 representan la tasa de fuga experimental medida en función, respectivamente, de la deformación plástica acumulada media a lo largo del contacto junta-resalte y de la longitud de contacto L_c calculadas con Cast3M para estos mismos ensayos. Las curvas 118.1 a 118.3 y 120.1 a 120.3 se refieren al resalte 104.3 para esfuerzos de 3, 5 y 10 N/mm. Para cada nivel de esfuerzo, se llevaron a cabo tres ensayos y se notificó la dispersión experimental con ayuda de barras de error. Finalmente, en cada nivel de esfuerzo, las mediciones y los cálculos se realizaron respectivamente a los 20 min, 40 min, 1 h, y después cada hora hasta las 10 h.

Los diferentes puntos de estas curvas corresponden, por tanto, a los valores en estos diferentes lapsos de tiempo.

Cuando se considera una única geometría de resalte, se observa por tanto, a partir de estas curvas, que la tasa de fuga está asociada directamente con la deformación plástica acumulada y con la longitud de contacto. Se observa que la tasa de fuga disminuye cuando aumentan las magnitudes pertinentes adoptadas, que son la deformación plástica acumulada y la longitud de contacto, y se constata una cierta continuidad durante el paso de un nivel de carga a otro. Una sola de estas magnitudes (deformación plástica acumulada o longitud de contacto) puede permitir estimar a priori la tasa de fuga, para un resalte de geometría fija.

Las curvas 122.1 a 122.4 y 124.1 a 124.4 de las figuras 17 y 18 representan también la tasa de fuga experimental medida en función, respectivamente, de la deformación plástica acumulada media a lo largo del contacto junta-resalte y de la longitud de contacto L_c calculadas con Cast3M para estos mismos ensayos, pero considerando los diferentes resaltes 104.1 a 104.4 y un nivel de esfuerzo de valor fijo (en este caso, 5 N/mm). Las barras de error corresponden a la dispersión experimental, y cada punto de estas curvas corresponde a una medición realizada en un determinado lapso de tiempo.

A diferencia del caso anterior (geometría fija y esfuerzo variable), cuando el nivel de carga (el esfuerzo) es fijo pero cambia el tipo de geometría del resalte, la relación que vincula la tasa de fuga con los parámetros estudiados (deformación plástica acumulada y longitud de contacto) no es directa dado que no hay ninguna función que asegure una continuidad de las magnitudes con el paso de una geometría a otra.

Se consideran otros elementos para enriquecer este enfoque. La deformación plástica acumulada y la longitud de contacto se correlacionan por tanto con diferentes potencias con el fin de asociarlas con la tasa de fuga medida. Así, por analogía con las leyes de tipo de daño según las cuales las tensiones y la deformación por acumulación de daño hacen aparecer huecos en el material que conducen a su rotura, la tasa de fuga está relacionada con la aparición o con la obstrucción de huecos en el medio poroso. El daño correspondiente en este caso a una obstrucción de huecos se expresará en función de los parámetros identificados, que son la deformación plástica acumulada p y la tensión axial Sm_{zz} . Situándose en un instante t , se conocen la tasa de fuga experimental así como el historial de la trayectoria de carga numérica.

La tensión axial Sm_{zz} y la deformación plástica acumulada p se calculan en los puntos de Gauss de los elementos. Para cada incremento de tiempo, se promedia el valor de estos parámetros en el elemento, después se llevan estos valores a los nodos para el procesamiento posterior. Se dispone entonces de un valor correspondiente a las condiciones necesarias para una obstrucción de hueco a nivel local, es decir para cada nodo a lo largo del contacto entre el asiento y la junta. Esta obstrucción de porosidad calculada para cada nodo se escribe como:

$$D_{\text{nodo}} = \int_p \lambda * \left(\frac{Sm_{zz}}{\sigma_{\text{umbral}}} \right)^\alpha * \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta dp \quad (13)$$

El intervalo de integración de p está comprendido entre 0 y el valor máximo alcanzado por p durante la simulación, denominado p_{max} .

A partir de la ecuación (11) que se deriva de la ley de Darcy, la obstrucción de porosidades está relacionada con la permeabilidad del medio así como con una altura de paso. Estas características pueden estar asociadas con la obstrucción de porosidad calculada D_{nodo} . Así, cuando aumenta D_{nodo} , esto significa que la porosidad está rellena y

5 que el fluido tendrá menos facilidad para escaparse por la porosidad. Este término corresponde entonces a $\frac{1}{\kappa(r)}$, término que debe integrarse a continuación a lo largo del contacto (correspondiendo la variable r a la posición a lo largo de este contacto) en el instante t considerado para tener en cuenta todas las rugosidades obstruidas o creadas que intervienen en la trayectoria de fuga.

10 Se obtiene, por tanto:

$$F_{num} = \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{k(r)r} = \int_{r_i}^{r_e} \frac{D_{nodo} * dr}{r} \quad (14)$$

15 Cuando se desconocen los coeficientes λ , α y β propios del material de la junta 9, éstos se determinan entonces minimizando la separación entre F_{exp} y F_{num} . Esta minimización se realiza por ejemplo, aplicando el método de los mínimos cuadrados: se parte de valores aproximados de los coeficientes λ , α y β con el fin de aproximar los valores de F_{exp} y F_{num} . Mediante un método iterativo de optimización, se trata entonces de reducir la separación de valores entre F_{exp} y F_{num} hasta llegar a la minimización deseada. Puede aceptarse, por ejemplo, una tolerancia igual a aproximadamente el 1% para esta separación de valores entre F_{exp} y F_{num} .

20 Por ejemplo, para una junta de Fecralloy, se obtiene por ejemplo: $\lambda = 1,86E15$, $\alpha = 5,58E-2$ y $\beta = -5,99E-2$.

25 Los coeficientes λ , α y β dan cuenta de la influencia de los dos parámetros considerados (deformación plástica acumulada a lo largo del contacto y tensión axial) y el papel preponderante constatado experimentalmente de la deformación plástica acumulada sobre la tasa de fuga. Así, si durante un ensayo se disminuye el esfuerzo aplicado y en consecuencia disminuye la tensión axial, la tasa de fuga no aumenta.

30 A partir del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} , puede evaluarse entonces la estanqueidad de la junta 9, y volver a hacer simulaciones modificando determinados parámetros geométricos de la junta para optimizar esta estanqueidad.

35 Conociendo los valores de los coeficientes λ , α y β para un material dado, puede estimarse por tanto la estanqueidad de cualquier tipo de junta que comprende este material realizando la simulación anteriormente descrita.

40 La curva 126 representada en la figura 19 corresponde a los valores de F_{num} obtenidos durante el procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta de Fecralloy anteriormente descrito y realizado con el resalte 104.1 con un esfuerzo igual a 3 N/mm. Mediante comparación, los puntos 128 representados en la figura 19 corresponden a los valores de F_{exp} calculados para una misma deformación de la junta.

45 La figura 20 representa un dispositivo 1000 de estimación de la estanqueidad de una junta. El dispositivo 1000 comprende el dispositivo 100 de medición anteriormente descrito, así como medios 200 informáticos adecuados para poner en práctica concretamente la simulación numérica de la deformación por fluencia de la junta y los diferentes cálculos realizados durante el procedimiento de estimación de la estanqueidad de la junta 9. Los medios 200 informáticos comprenden, por ejemplo, uno o varios ordenadores en los que se instalan medios de software, tales como el software de cálculo mecánico mediante elementos finitos, que puede calcular concretamente los campos mecánicos locales durante la simulación de la deformación por fluencia de la junta, por ejemplo, el software Cast3M. Los medios 200 informáticos también pueden comprender medios de cálculo para calcular, por ejemplo, el coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} a partir de las mediciones realizadas mediante el dispositivo 100 de medición o calcular los coeficientes λ , α y β minimizando la separación entre los valores de los coeficientes F_{num} y F_{exp} . Para ello, los medios informáticos pueden acoplarse al dispositivo 100 de medición, tal como se representa en la figura 20, con el fin que de puedan realizarse intercambios de datos entre los medios 200 informáticos y los medios de medición y/o de mando del dispositivo 100 de medición. El dispositivo 100 de medición puede controlarse concretamente, durante las mediciones de una fuga de la junta 9, mediante los medios 200.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta (9), que comprende al menos las siguientes etapas:

5 - simular numéricamente una deformación por fluencia de la junta (9) mediante aplastamiento de la junta (9) entre dos asientos (103, 107);

10 - calcular, en al menos una superficie de contacto entre la junta (9) y uno de los dos asientos (103), una deformación plástica acumulada p de la junta (9), una tensión axial Smzz entre la junta (9) y dicho uno de los dos asientos (103), y una longitud de contacto Lc entre la junta (9) y dicho uno de los dos asientos (103), durante la simulación numérica;

15 - calcular un coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num}, representativo de la estanqueidad de la junta (9) en dicha superficie de contacto entre la junta (9) y dicho uno de los dos asientos (103), de tal manera que:

$$F_{num} = \int_{ri}^{re} \int_0^{pmax} \lambda \cdot \left(\frac{Smzz}{\sigma_{umbral}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{p}{p_0} \right)^\beta dp \frac{dr}{r} ,$$

20 con

λ, α y β: coeficientes cuyos valores dependen del material de la junta (9),

25 re y ri: respectivamente el radio exterior y el radio interior de la deformación de la junta, en m,

r: posición a lo largo del contacto entre la junta y dicho al menos uno de los dos asientos,

Lc = re - ri, en m,

30 Smzz: tensión axial, en MPa,

σ_{umbral}: tensión umbral igual a 1 MPa,

35 p: deformación plástica acumulada,

pmax: valor máximo alcanzado por p durante la simulación,

p₀: constante igual a 1,

40 y en el que la simulación numérica y los cálculos se ponen en práctica por ordenador.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además, tras la etapa de cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num}, una etapa de cálculo de un caudal másico de fuga simulado Q_{mnum} de un fluido en el interior de un espacio estanqueizado mediante la junta (9), de tal manera que:

45

$$Q_{mnum} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot F_{num}} (Pe^2 - Pi^2) ,$$

con

50 M: masa molar del fluido, en kg/mol

μ: viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

R = 8,314 J/K/mol

55

T: temperatura del fluido, en K

Pi: presión en el espacio estanco, en Pa

Pe: presión fuera del espacio estanco, en Pa.

5 3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende además, cuando se desconocen los valores de los coeficientes λ , α y β para el material de la junta (9), una determinación de los valores de los coeficientes λ , α y β correspondientes al material de la junta (9) obtenida realizando las siguientes etapas:

10 - medir un caudal másico Q_m de un fluido que permite mantener este fluido a una presión Pi sensiblemente constante en un espacio estanco mediante una segunda junta (10) que comprende dicho material durante una deformación por fluencia de la segunda junta (10) mediante aplastamiento de la segunda junta (10) entre dos asientos (102, 106),

15 - calcular un coeficiente de obstrucción de porosidades experimental F_{exp} , representativo de la estanqueidad de la segunda junta (10) en al menos una superficie de contacto entre la segunda junta (10) y uno de los dos asientos (102), de tal manera que:

$$F_{exp} = \frac{\pi \cdot M}{\mu \cdot R \cdot T \cdot Q_m} (Pe^2 - Pi^2),$$

20 con

M: masa molar del fluido, en kg/mol

25 μ : viscosidad dinámica del fluido, en Pa.s

R = 8,314 J/K/mol

30 T: temperatura del fluido, en K

Q_m : caudal másico del fluido, en kg/s

Pi: presión en el espacio estanco, en Pa

35 Pe: presión fuera del espacio estanco, en Pa,

y, tras el cálculo del coeficiente de obstrucción de porosidades simulado F_{num} , una etapa de cálculo de los valores de los coeficientes λ , α y β realizada mediante minimización de la separación entre los valores de los coeficientes F_{num} y F_{exp} .

40 4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la etapa de cálculo de los valores de los coeficientes λ , α y β se realiza aplicando el método de los mínimos cuadrados.

45 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 3 ó 4, en el que la etapa de medición del caudal másico Q_m se obtiene realizando:

- una primera etapa de aumento de la temperatura de la segunda junta (10) y de los asientos (102, 106);

50 - una segunda etapa de puesta en contacto y de puesta a presión de los asientos (102, 106) contra la segunda junta (10);

- una tercera etapa de mantenimiento de la presión ejercida por los asientos (102, 106) contra la segunda junta (10);

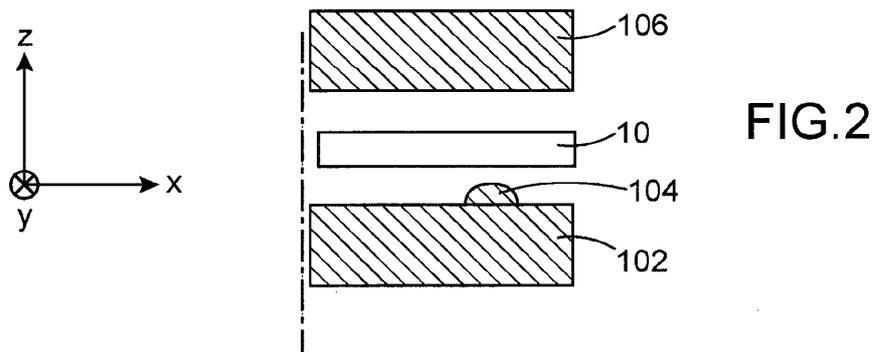
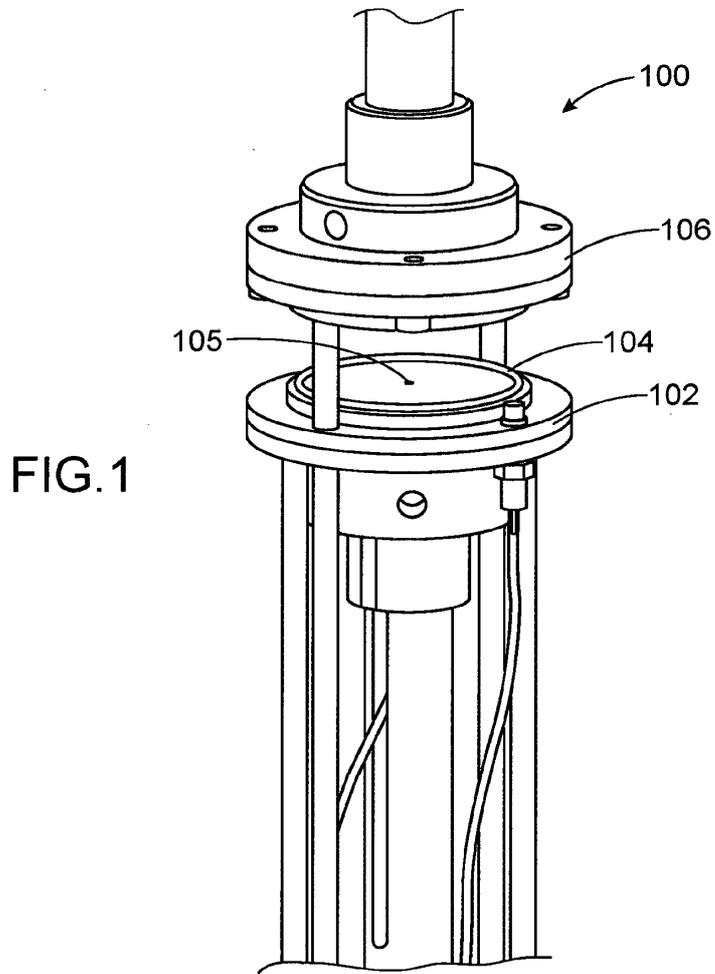
55 - una cuarta etapa de reducción de la presión ejercida por los asientos (102, 106) contra la segunda junta (10);

- una quinta etapa de separación de al menos uno de los asientos (102, 106) y de la segunda junta (10).

60 6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que la primera etapa de aumento de la temperatura se pone en práctica hasta alcanzar una temperatura comprendida entre aproximadamente 600°C y 1000°C, y/o en el que la presión ejercida por los asientos (102, 106) sobre la segunda junta (10) durante la tercera etapa

corresponde a un esfuerzo ejercido por al menos uno de los asientos (102, 106) sobre la segunda junta (10) comprendido entre aproximadamente 3 N/mm y 10 N/mm, y/o en el que la tercera etapa de mantenimiento de la presión ejercida por los asientos (102, 106) sobre la segunda junta (10) se pone en práctica durante un período comprendido entre aproximadamente 5 horas y 15 horas.

- 5
7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa de simulación numérica se pone en práctica por medio de un software de cálculo mecánico mediante elementos finitos.
- 10
8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, que comprende además, antes de la etapa de simulación numérica, una etapa de medición mediante perfilometría láser del perfil de la junta (9) y/o de los asientos (103, 107), un mallado numérico de la junta (9) y/o de los asientos (103, 107), usado durante la etapa de simulación numérica, realizándose a partir del perfil medido de la junta (9) y/o de los asientos (103, 107).
- 15
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la longitud de contacto L_c se obtiene calculando, mediante extrapolación polinómica de la tensión axial S_{mzz} expresada en función de una posición a nivel de dicha superficie de contacto entre la junta (9) y dicho uno de los dos asientos (103), los valores de dos abscisas correspondientes al valor máximo dividido entre 10 de la tensión axial S_{mzz} , correspondiendo la longitud de contacto L_c a la diferencia entre dichos valores de las dos abscisas.
- 20
10. Dispositivo (1000) de estimación de la estanqueidad de una junta (9), que comprende medios (100, 200) adecuados para poner en práctica un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta (9) según una de las reivindicaciones anteriores.
- 25
11. Producto de programa informático que tiene en memoria un código ejecutable para la puesta en práctica de un procedimiento de estimación de la estanqueidad de una junta (9) según una de las reivindicaciones 1 a 9.



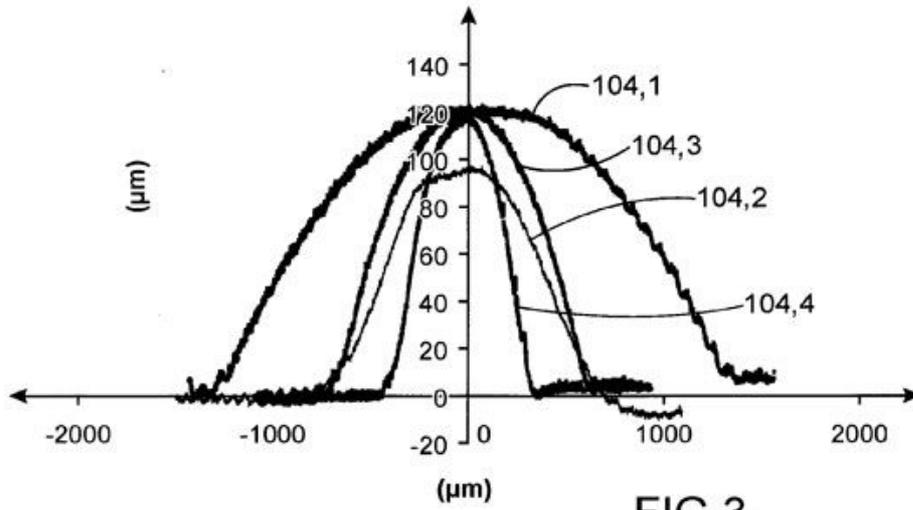
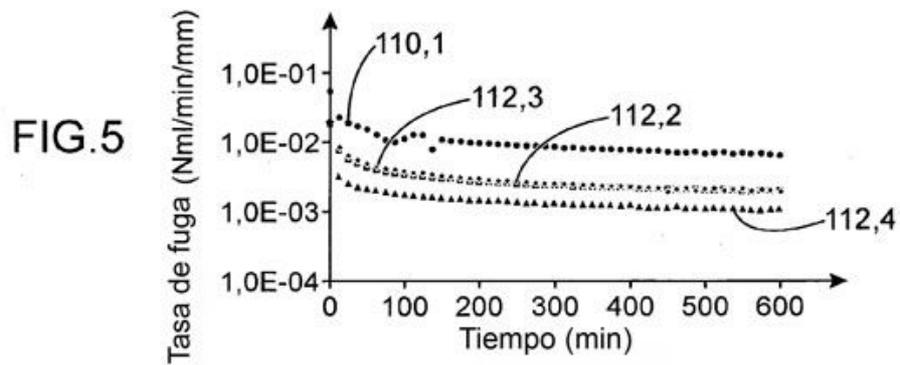
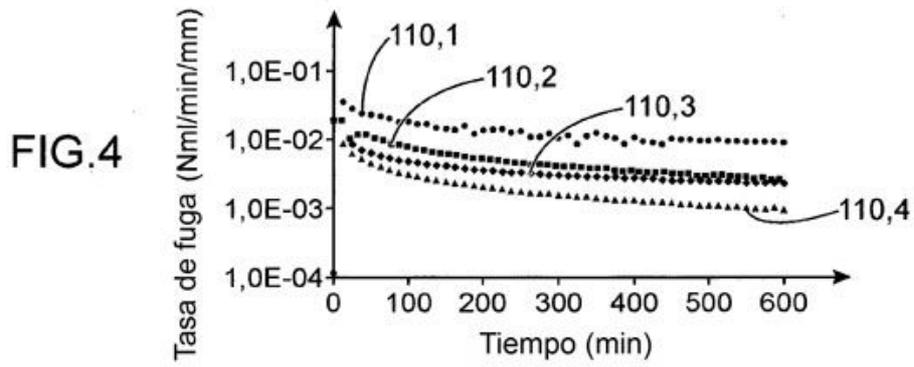


FIG. 3



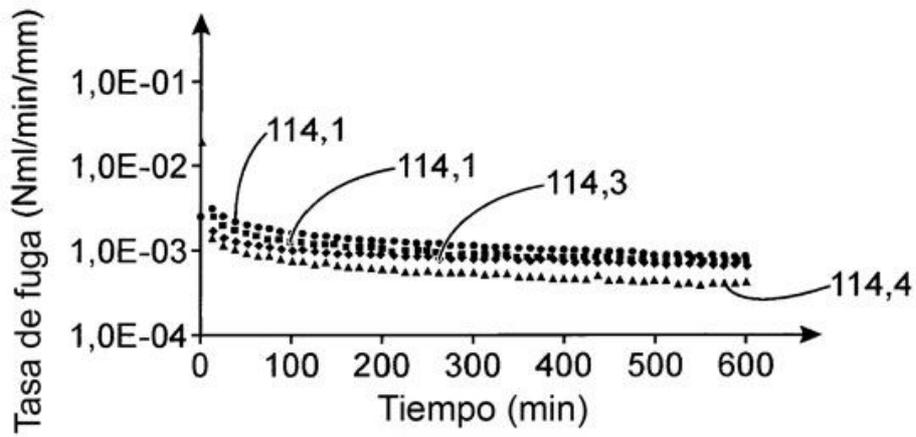


FIG. 6

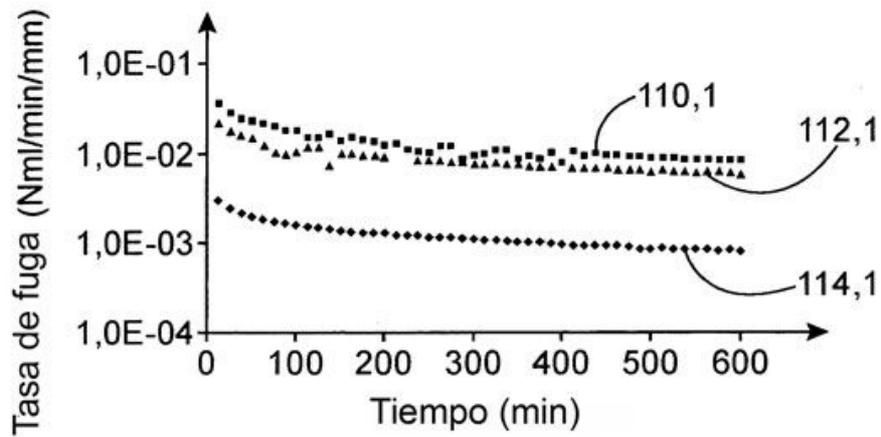


FIG. 7

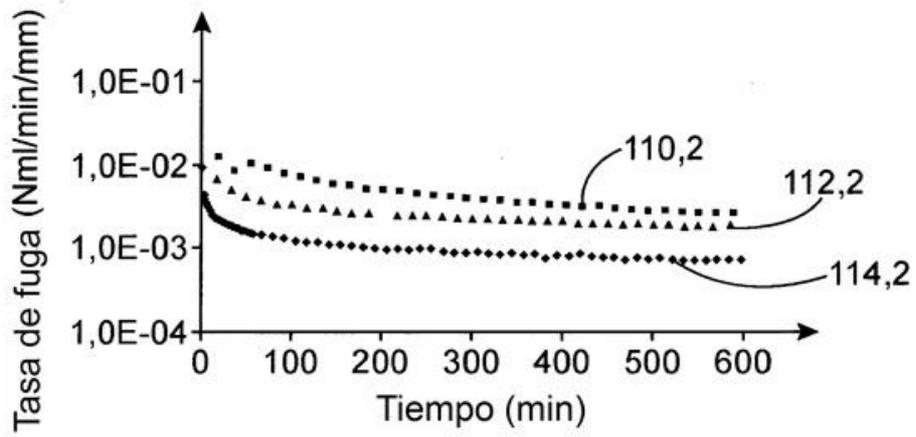


FIG.8

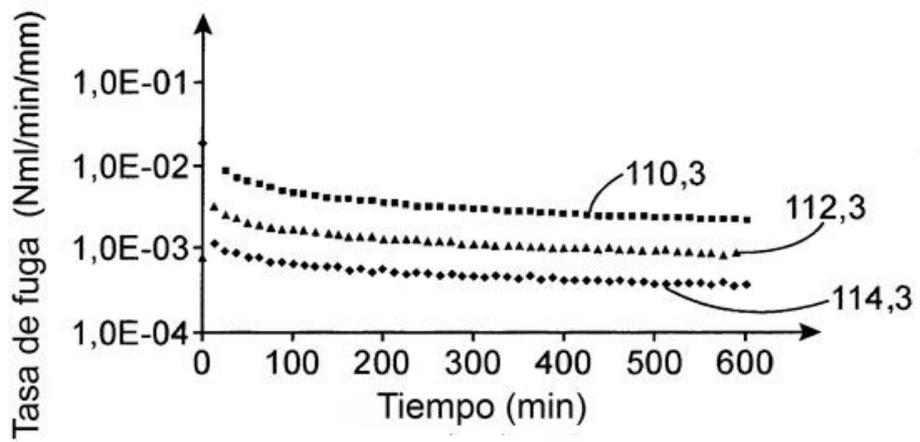


FIG.9

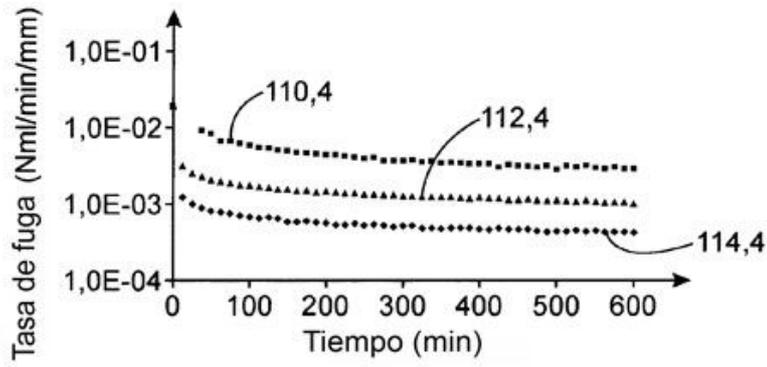


FIG. 10

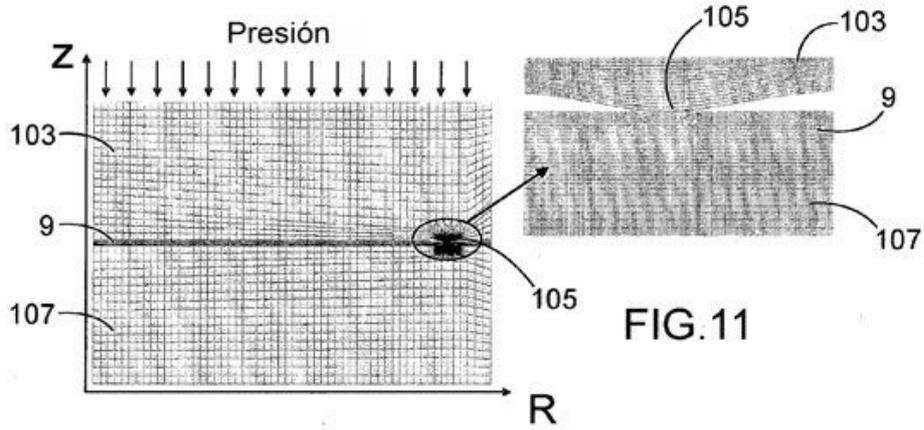


FIG. 11

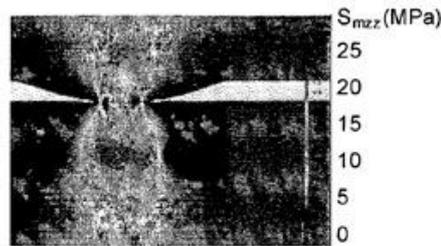


FIG. 12

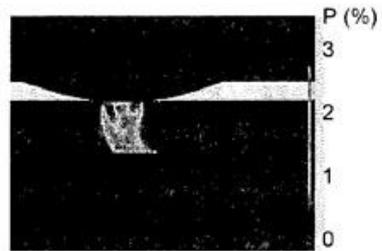
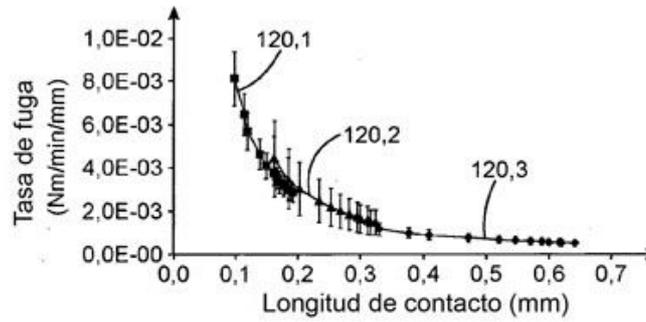
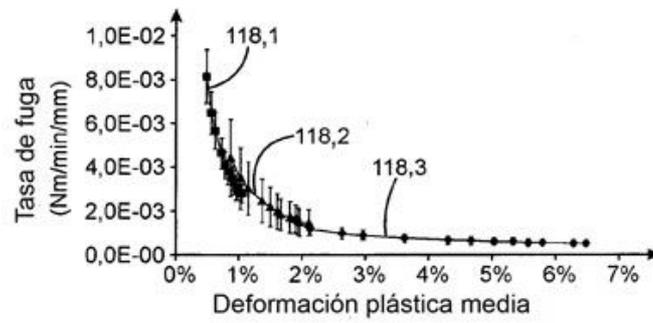
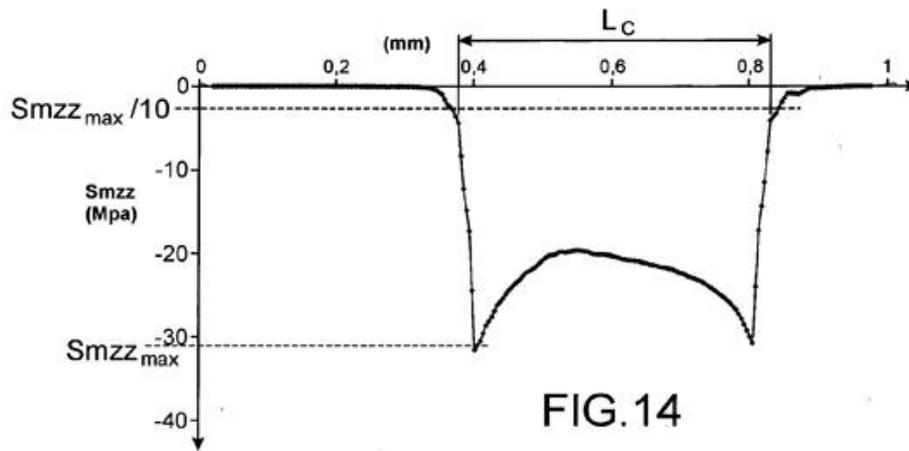


FIG. 13



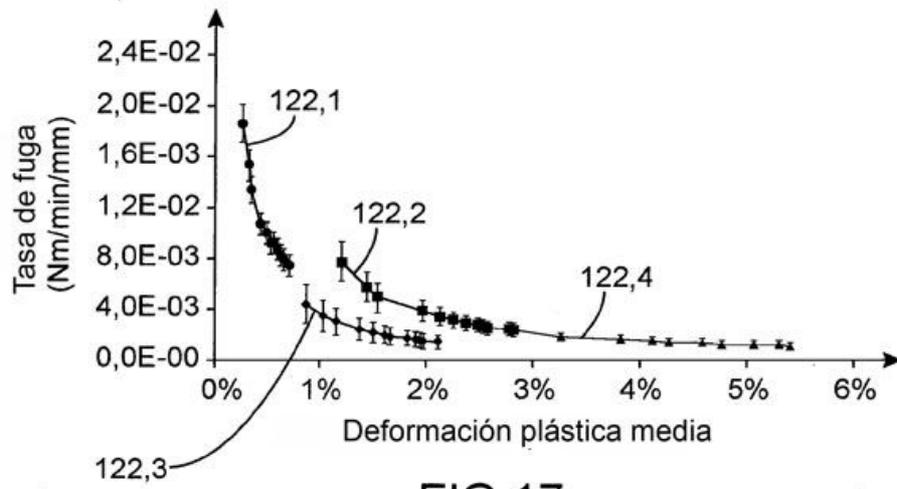


FIG.17

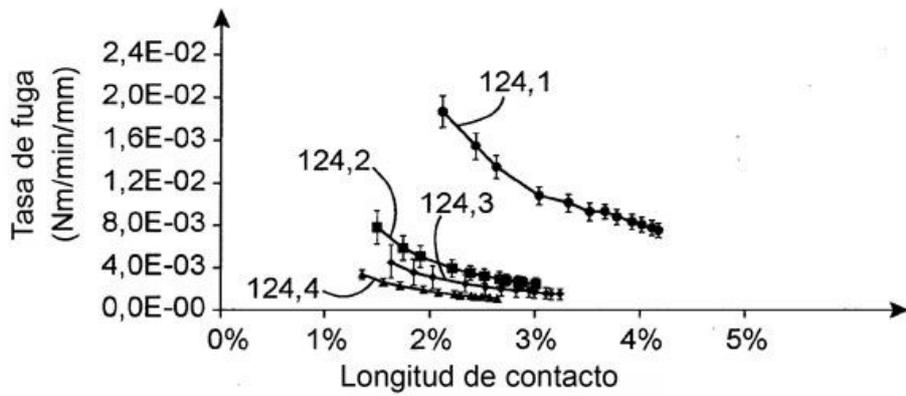


FIG.18

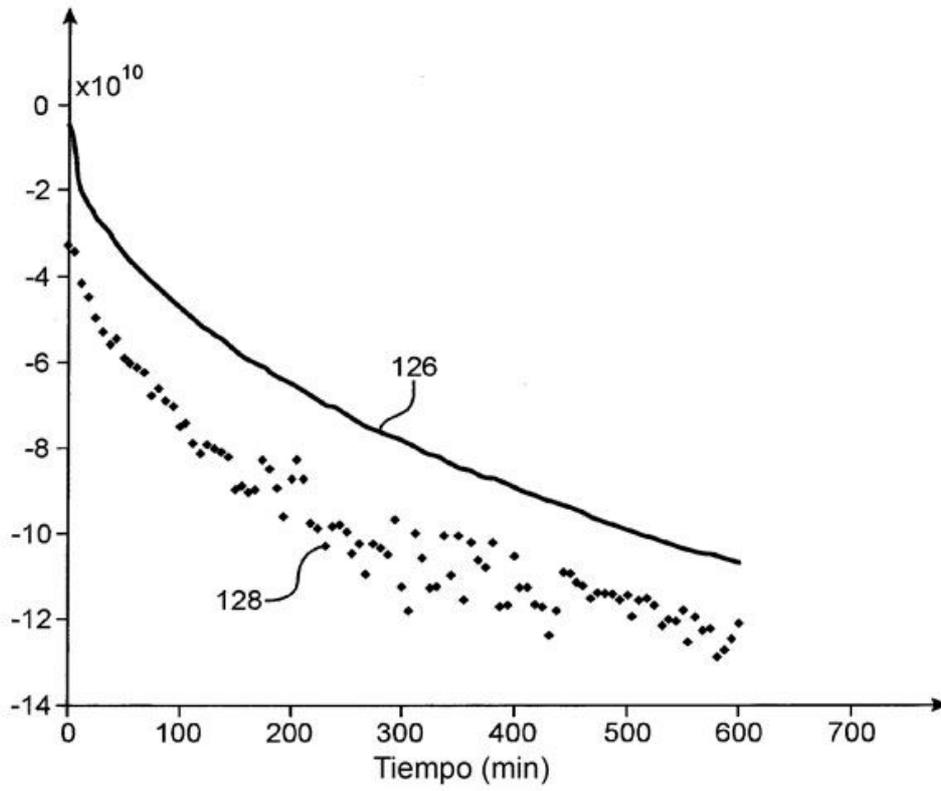


FIG.19

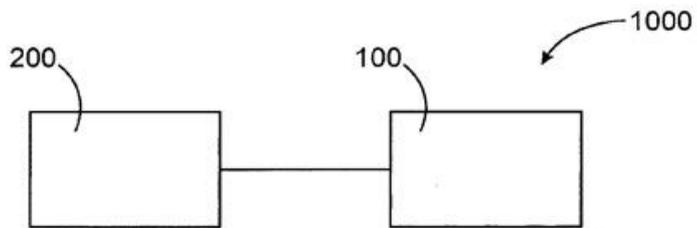


FIG.20