

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 483 540**

51 Int. Cl.:

B21D 51/26 (2006.01)

B21D 26/033 (2011.01)

B21D 26/041 (2011.01)

B21D 26/047 (2011.01)

B21D 26/049 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.05.2005 E 05742599 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.07.2014 EP 1747075**

54 Título: **Métodos y aparato para formar artículos huecos de metal**

30 Prioridad:

14.05.2004 US 571472 P

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

06.08.2014

73 Titular/es:

**NOVELIS, INC. (100.0%)
3560 Lenox Road, Suite 2000
Atlanta, GA 30326 , US**

72 Inventor/es:

**MACEWEN, STUART R.;
SHI, YIHAI;
HAMSTRA, PETER;
MALLORY, ROBERT, WILLIAM y
MOULTON, JAMES, D.**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 483 540 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

Métodos y aparato para formar artículos huecos de metal

5 Campo técnico

Esta invención se refiere a métodos de formar artículos huecos de metal utilizando presión de fluido interna para expandir una preforma hueca de metal o pieza contra una cavidad de troquel, y especialmente a métodos de formación por presión-pistón. En un sentido específico importante, la invención se refiere a métodos de formar artículos huecos de aluminio u otro metal que tienen una forma contorneada, por ejemplo tal como una forma de botella con características asimétricas. A efectos de ilustración se hará aquí referencia especial a formar recipientes de metal, pero la invención en sus aspectos más amplios no se limita a ello.

15 Antecedentes de la invención

Las latas de metal son conocidas y ampliamente usadas para bebidas. Los cuerpos de latas de bebida de hoy día, tanto si son cuerpos "estirados y planchados" de una pieza, como cuerpos abiertos en ambos extremos (con un elemento separado de cierre en la parte inferior así como en la parte superior), tienen por lo general paredes laterales cilíndricas verticales simples. A veces se desea, por razones de estética, atracción del consumidor y/o identificación del producto, impartir una forma diferente y más compleja a la pared lateral y/o parte inferior de un recipiente metálico para bebidas, y en particular, a proporcionar un recipiente de metal con la forma de una botella más bien que una forma de lata cilíndrica ordinaria. Sin embargo, las operaciones convencionales de producción de latas, no logran tales configuraciones.

La Patente de Estados Unidos número 6.802.196 concedida el 12 de Octubre de 2004 a Kevin Gong y colaboradores describe métodos y aparatos convenientes y efectivos para convertir piezas metálicas en artículos huecos de metal que tienen formas de botella u otras formas complejas, incluyendo métodos y aparatos capaces de formar formas contorneadas que no son radialmente simétricas, para mejorar la variedad de diseños obtenibles.

En particular, la Patente de Estados Unidos número 6.802.196 describe un método de formar un artículo hueco de metal tal como un envase de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo disponer una preforma hueca de metal que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel lateralmente cerrada por una pared de troquel que define la forma y dimensiones laterales, con un punzón situado en un extremo de la cavidad y trasladable a la cavidad, colocándose el extremo cerrado de la preforma en relación opuesta próxima al punzón y estando al menos una porción de la preforma inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel; someter la preforma a presión de fluido interna neta para expandir la preforma hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello la forma y dimensiones laterales definidas a la preforma, ejerciendo la presión de fluido una fuerza, en el extremo cerrado de la preforma, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad; y, antes o después de que la preforma comience a expandirse, pero antes de que la expansión de la preforma haya terminado, trasladar el punzón a la cavidad para enganchar y desplazar el extremo cerrado de la preforma en una dirección opuesta a la dirección de la fuerza ejercida por la presión de fluido en ella, deformando el extremo cerrado de la preforma. La traslación del punzón es efectuada por un pistón que es capaz de aplicar suficiente fuerza al punzón para desplazar y deformar la preforma. Este método se denomina un procedimiento de formación por presión-pistón (PRF), porque el envase se forma tanto por la presión de fluido interna aplicada como por la traslación del punzón por el pistón. El término "presión de fluido interna neta" en el sentido en que se usa aquí significa una presión diferencial interior a exterior positiva a través de la pared de la preforma.

El punzón tiene una superficie contorneada (por ejemplo abovedada), deformándose el extremo cerrado de la preforma de manera que se conforme a la superficie contorneada. La cavidad de troquel tiene un eje largo, teniendo la preforma un eje largo y estando dispuesta de forma sustancialmente coaxial dentro de la cavidad, y pudiendo trasladarse el punzón a lo largo del eje largo de la cavidad. Cuando la pared del troquel incluye un troquel dividido (formado por dos o más segmentos de acoplamiento alrededor de la periferia de la cavidad de troquel) separable para extracción de los artículos huecos de metal formados, la forma definida puede ser asimétrica alrededor del eje largo de la cavidad; es decir, la formación por PRF puede producir un perfil asimétrico (por ejemplo, patas en la parte inferior o nervios en espiral en el lado del envase).

El punzón se coloca preferiblemente inicialmente cerca de o en contacto con el extremo cerrado de la preforma, antes de la aplicación de presión de fluido, con el fin de limitar el alargamiento axial de la preforma por la presión de fluido. La traslación del punzón puede ser iniciada después de que la expansión de la porción inferior de la preforma llegue a contacto con la pared del troquel.

La preforma, especialmente cuando el artículo hueco de metal a formar es un envase en forma de botella o análogos, es preferiblemente una pieza alargada e inicialmente generalmente cilíndrica que tiene un extremo abierto frente de su extremo cerrado. Puede ser de diámetro sustancialmente igual a la porción de cuello de la forma de botella, y puede tener suficiente formabilidad de manera que sea expansible a la forma definida en una sola operación de formación por presión. Si carece de tal formabilidad, los pasos preliminares de colocar la pieza en una

cavidad de troquel más pequeña que la cavidad de troquel mencionada en primer lugar, y someter la pieza en ella a presión de fluido interna para expandir la pieza a un tamaño y forma intermedios más pequeños que la forma y las dimensiones laterales definidas, se realizan antes del método PRF descrito anteriormente. Alternativamente, si la pieza alargada e inicialmente generalmente cilíndrica es de diámetro inicial más grande que la porción de cuello de la forma de botella, el método de formar un envase en forma de botella puede incluir un paso de someter la pieza, junto a su extremo abierto, a una operación de formación de cuello para formar una porción de cuello de diámetro reducido, después de la realización del procedimiento PRF; o el diámetro de la zona de cuello de la preforma se puede reducir usando un procedimiento de formación de cuello en troquel que se puede aplicar antes de la etapa de expansión.

Durante el paso de someter la preforma a presión de fluido interna, la presión de fluido dentro de la preforma tiene lugar en etapas sucesivas de (i) subir a un primer pico antes de que comience la expansión de la preforma, (ii) bajar a un valor mínimo cuando comienza la expansión, (iii) subir gradualmente a un valor intermedio mientras prosigue la expansión hasta que la preforma esté en contacto extendido aunque no completo con la pared del troquel, y (iv) subir desde la presión intermedia durante la terminación de la expansión de la preforma. Indicado con referencia a esta secuencia de etapas de presión, la iniciación de la traslación del punzón para desplazar y deformar el extremo cerrado de la preforma en una realización preferida de la invención tiene lugar sustancialmente al final de la etapa (iii).

Típicamente, cuando se aplica la presión interna de fluido, el extremo cerrado de la preforma asume una configuración ampliada y generalmente semiesférica cuando la preforma entra en contacto con la pared del troquel; y la iniciación de la traslación del punzón tiene lugar sustancialmente al tiempo que el extremo cerrado de la preforma asume esta configuración.

El paso de someter la preforma a presión de fluido interna puede incluir aplicar simultáneamente presión de fluido positiva interna y presión de fluido positiva externa a la preforma en la cavidad, siendo la presión de fluido positiva interna más alta que la presión de fluido positiva externa. Las presiones interna y externa las facilitan, respectivamente, dos sistemas de presión controlables independientemente. La tasa de deformación en la preforma se controla controlando independientemente las presiones de fluido positivas interna y externa a las que la preforma se somete simultáneamente para variar la diferencia entre la presión de fluido positiva interna y la presión de fluido positiva externa. De esta forma, se puede lograr un control más exacto de las tasas de deformación. Además, la presión hidrostática incrementada puede reducir los efectos nocivos del daño (vacíos) asociado con la microestructura del material.

Se puede aplicar calor durante la expansión de la preforma, con el fin de inducir un gradiente de temperatura en la preforma.

Añadiendo calefactores al punzón, se induce un gradiente de temperatura en la preforma de abajo arriba. Se puede añadir encima del troquel calefactores separados que inducen un gradiente de temperatura en la preforma de arriba abajo. Se puede incluir más calefactores en las paredes laterales de la cavidad de troquel.

También se ha hallado ventajoso tener el punzón en contacto con la parte inferior de la preforma antes del inicio de la fase de expansión y aplicar alguna carga axial por el punzón durante toda la fase de expansión. Con este procedimiento donde el punzón aplica cierta carga axial al extremo cerrado de la preforma en toda la fase de expansión, el desplazamiento y la deformación del extremo cerrado de la preforma no se realizan preferiblemente hasta la terminación de la fase de expansión.

Se puede aplicar presiones de fluido positivas interna y externa alimentando gas al interior de la preforma y a la cavidad de troquel externamente a la preforma, respectivamente, a través de canales separados. Se puede aplicar calor a la preforma por múltiples grupos de elementos de calentamiento respectivamente incorporados en las porciones superior e inferior de la estructura de troquel y bajo control de temperatura independiente para controlar el gradiente de temperatura en la preforma. Adicional o alternativamente, se puede aplicar calor a la preforma por un elemento de calentamiento dispuesto dentro de la preforma de forma sustancialmente coaxial con ella; y también se puede suministrar calor a la preforma calentando el punzón.

Además, donde la porción de cuello de la forma de envase definida incluye una rosca de tornillo u lengüeta para fijar un cierre roscado al artículo formado, y/o un aro de cuello, la pared del troquel puede tener una porción de cuello con una rosca u lengüeta formada en él para impartir una rosca a la preforma durante la expansión de la preforma.

Hasta ahora, en las operaciones de formación por presión-pistón el énfasis se ha puesto en la producción fiable de artículos tal como envases para cumplir los requisitos del cliente, utilizando presiones que son "seguras" (desde el punto de vista de evitar fallos) y tiempos de ciclo relativamente largos consiguientes. En el sentido en que se usa aquí, "fallo" significa un defecto estructural tal como un agujero o hendidura en el artículo producido, que se deba a un defecto en la fabricación de la preforma y/o un límite inherente a la formabilidad de la aleación.

Sin embargo, por razones de economía de la fabricación, sería deseable disminuir el tiempo de ciclo (tiempo para

formar un envase u otro artículo) del proceso PRF logrando al mismo tiempo propiedades de formación aceptables y, en particular, evitando fallos en los artículos producidos. Más en general, sería deseable lograr un mejor control por ordenador de los complejos procesos de formación tales como el proceso PRF.

5 CA-A-2445582 se considera la técnica anterior más próxima con respecto a las reivindicaciones 1 y 13 que describen un proceso para formar una pieza a partir de una preforma de metal hueca inicial en un artículo hueco de metal dentro de un troquel sometiendo la pieza a presión de fluido interna neta de tal manera que la pieza se expanda a contacto con una pared de definición de forma del artículo del troquel, donde el método incluye seleccionar un conjunto de parámetros del proceso. CA-A-2445582 describe un proceso según la parte de
10 preámbulo de la reivindicación 13.

Descripción de la invención

15 La presente invención, según las características de la reivindicación 1, contempla la provisión de un método ejecutado por un sistema informático como parte de un programa implementado por ordenador para optimizar la historia de presión-tiempo para un proceso para formar una pieza a partir de una preforma hueca inicial de metal a un artículo hueco de metal dentro de un troquel sometiendo la pieza a presión de fluido interna neta de tal manera que la pieza se expanda a contacto con una pared de definición de forma del artículo del troquel, evitando al mismo tiempo el fallo de la pieza, incluyendo los pasos de seleccionar un conjunto de parámetros del proceso incluyendo la
20 temperatura y las propiedades del material de la preforma y las dimensiones; determinar, a partir del conjunto de parámetros, al menos un criterio de fallo que limita las condiciones de presión-tiempo a las que la pieza se puede someter sin fallo; y realizar iterativamente análisis de elementos finitos en la pieza, en base al conjunto de parámetros seleccionado y el criterio de fallo determinado, en cada uno de una pluralidad de valores diferentes de condiciones de presión-tiempo (P, t), para determinar condiciones límite de presión-tiempo (P_b, t_b) para el proceso,
25 donde cada valor de las condiciones de presión-tiempo incluye un valor de presión de fluido interna neta (P) y un intervalo de tiempo (t) en el que el valor de presión de fluido interna neta mencionado en último lugar se aplica a la pieza.

30 El criterio de fallo se puede seleccionar del grupo que consta de mínimo grosor de pared, deformación y tasa de deformación.

El paso de determinar (P_b, t_b) puede incluir seleccionar un intervalo de tiempo y realizar iterativamente dichos análisis de elementos finitos en la pieza en cada uno de una pluralidad de valores de presión diferentes, para determinar, como una condición límite, un valor de presión de fluido interna neta máxima al que la pieza puede ser
35 sometida durante dicho intervalo de tiempo sin fallo.

Adicionalmente, el método puede incluir los pasos de determinar un segundo conjunto de parámetros del proceso correspondientes al conjunto de parámetros del proceso mencionado en primer lugar, pero modificados por la deformación impuesta a la pieza por sujeción a las condiciones límite de presión-tiempo mencionadas en primer
40 lugar (P_{b1} – t_{b1}; determinar, a partir del segundo conjunto de parámetros del proceso, al menos un segundo criterio de fallo; y determinar, por análisis de elementos finitos realizados iterativamente en base al segundo conjunto de parámetros y el segundo criterio de fallo determinado, segundas condiciones límite de presión-tiempo (P_{b2}, t_{b2}) para el proceso.

45 Estos pasos se pueden repetir para determinar una pluralidad n de condiciones límite de presión-tiempo donde 3 ≤ n y donde, para cada entero i tal que 3 ≤ i ≤ n, el i-ésimo conjunto de parámetros del proceso corresponda al (i-1)ésimo conjunto de parámetros del proceso pero modificados por deformación impuesta a la pieza por sujeción a las (i-1)ésimas condiciones límite de presión-tiempo (P_{bi-1}, t_{bi-1}), el i-ésimo criterio de fallo se determina de a partir del i-ésimo conjunto de parámetros del proceso, y las i-ésimas condiciones límite de presión-tiempo (P_{bi}, t_{bi}) son
50 determinadas por análisis de elementos finitos realizados iterativamente en base al i-ésimo conjunto de parámetros y el i-ésimo criterio de fallo determinado, para determinar por ello n conjuntos sucesivos de condiciones límite de presión-tiempo ({P_{b1}, t_{b1}} ... {P_{bn}, t_{bn}}) que constituyen colectivamente una historia de presión-tiempo optimizada para el proceso.

55 En el último método, al menos un conjunto de condiciones límite de presión-tiempo puede ser determinado por análisis de elementos finitos realizados iterativamente como se ha indicado en cada uno de una pluralidad de valores de presión (P) para un valor de tiempo preseleccionado (t). Alternativamente, al menos un conjunto de condiciones límite de presión-tiempo se determina por análisis de elementos finitos realizados iterativamente como se ha indicado en cada uno de una pluralidad de valores de tiempo (t) para un valor de presión preseleccionado (P).

60 La invención abarca preferiblemente un proceso para formar un artículo hueco de metal de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo los pasos de disponer una preforma hueca de metal que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel lateralmente cerrada por una pared de troquel que define dicha forma y dimensiones laterales, colocándose el extremo cerrado de la preforma en relación opuesta a un extremo de la cavidad y estando
65 al menos una porción de la preforma inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel, y, bajo control de un ordenador, someter la preforma a presión de fluido interna neta para expandir la preforma hacia fuera a contacto

5 sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello dicha forma y dimensiones laterales definidas a la preforma, ejerciendo la presión de fluido neta una fuerza, en el extremo cerrado, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad, donde la mejora incluye suministrar, al ordenador, una historia de presión-tiempo optimizada para el proceso determinado como se ha descrito anteriormente, y someter la preforma a n conjuntos sucesivos de condiciones de presión-tiempo respectivamente correspondientes a n conjuntos sucesivos de condiciones límite de presión-tiempo ($\{P_{b1}, t_{b1}\}, \dots \{P_{bn}, t_{bn}\}$) que constituyen la historia de presión-tiempo optimizada.

10 Adicionalmente, la invención abarca preferiblemente un proceso PRF para formar un artículo hueco de metal (por ejemplo, un recipiente de metal) de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo disponer una preforma hueca de metal que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel lateralmente cerrada por una pared de troquel que define la forma y dimensiones laterales, con un punzón situado en un extremo de la cavidad y trasladable a la cavidad, colocándose el extremo cerrado de la preforma en relación opuesta próxima al punzón y estando al menos una porción de la preforma inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel; bajo control de un ordenador, someter la preforma a presión de fluido interna neta para expandir la preforma hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello la forma y dimensiones laterales definidas a la preforma, ejerciendo la presión de fluido una fuerza, en el extremo cerrado de la preforma, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad; y trasladar el punzón a la cavidad para enganchar y desplazar el extremo cerrado de la preforma en una dirección opuesta a la dirección de fuerza ejercida por presión de fluido en ella, deformando el extremo cerrado de la preforma; donde la mejora incluye suministrar, al ordenador, condiciones límite de presión-tiempo determinadas para dicho proceso por el método descrito anteriormente, y someter la preforma a condiciones de presión-tiempo correspondientes a dichas condiciones límite de presión-tiempo. La presente invención, según las características de la reivindicación 13 también incluye un proceso PRF que incluye los pasos de determinar, para la preforma, un criterio de fallo (por ejemplo, un valor limitativo de la tasa de deformación) que limita las condiciones de presión-tiempo a las que la pieza puede ser sometida sin fallo; realizando iterativamente análisis de elementos finitos en la preforma, desarrollar una historia de presión-tiempo para la preforma incluyendo un valor inicial de presión de fluido interna neta, un intervalo de tiempo inicial durante el que presión al valor inicial se ha de aplicar a la preforma, una pluralidad de intervalos de tiempo secuenciales siguientes al intervalo inicial, y una pluralidad correspondiente de valores de presión de fluido interna neta sucesivamente inferiores a aplicar respectivamente a la preforma durante la pluralidad de intervalos de tiempo secuenciales, donde los valores de presión de fluido interna y las duraciones de los intervalos de tiempo son tales que el criterio de fallo nunca se supere durante toda la historia de presión-tiempo; suministrar la historia de presión-tiempo al ordenador; y someter la preforma a presión de fluido interna neta sometiendo la preforma a la historia de presión-tiempo.

35 Un proceso PRF según la invención puede incluir los pasos de detectar el contacto de la preforma con una posición preseleccionada en la pared del troquel y/o detectar condiciones de temperatura a las que la preforma se somete durante la realización del proceso, y suministrar la información detectada al ordenador, donde el control por ordenador del proceso es sensible a la información suministrada.

40 Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una vista en perspectiva simplificada y algo esquemática del utillaje para realizar el método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196, en realizaciones ilustrativas.

45 Las figuras 2A y 2B son vistas similares a la figura 1 de etapas secuenciales en la realización de una primera realización del método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196.

La figura 3 es un gráfico de presión interna y desplazamiento del pistón como funciones del tiempo, usando aire como el medio fluido, que ilustra la relación temporal entre los pasos de someter la preforma a presión de fluido interna y trasladar el punzón en el método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196.

50 Las figuras 4A, 4B, 4C y 4D son vistas similares a la figura 1 de las etapas secuenciales de la realización de una segunda realización del método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196.

55 Las figuras 5A y 5B son, respectivamente, una vista similar a la figura 1 y una vista en perspectiva esquemática simplificada de un paso de formación de espín, que ilustra etapas secuenciales en la realización de una tercera realización del método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196.

60 Las figuras 6A, 6B, 6C y 6D son vistas esquemáticas en alzado generadas por ordenador de etapas sucesivas en el método de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196.

65 La figura 7 es un gráfico de la variación de la presión con el tiempo (usando unidades de tiempo arbitrarias) que ilustran la característica de aplicar simultáneamente presiones de fluido positivas interna y externa controlables independientemente a la preforma en la cavidad de troquel y comparar con ellas la variación de presión interna (como en la figura 3) en ausencia de presión positiva externa.

La figura 8 es un gráfico de la variación de la deformación con el tiempo, derivado de análisis de elementos finitos,

que representa la deformación para una posición particular (elemento) bajo las dos condiciones de presión diferentes comparadas en la figura 7;

5 La figura 9 es un gráfico similar a la figura 7 que ilustra un mecanismo de control concreto que puede ser usado en el proceso de formación cuando las presiones de fluido positivas interna y externa son aplicadas simultáneamente a la preforma en la cavidad de troquel.

La figura 10 es una ilustración esquemática de una preforma en expansión usando un punzón calentado.

10 La figura 11 es un gráfico que representa cargas en el punzón, presiones internas y desplazamientos del punzón durante la expansión de una preforma.

15 La figura 12 es una vista en perspectiva que representa etapas en la producción de una preforma a partir de un disco plano.

La figura 13 es una vista en alzado en sección de una realización ilustrativa del aparato de la Patente de Estados Unidos número 6.802.196 para uso al realizar su método.

20 La figura 14 es una vista en perspectiva, parcialmente despiezada, del aparato de la figura 13.

Las figuras 15A, 15B y 15C son vistas en perspectiva de una mitad del troquel dividido del aparato de las figuras 13 y 14 respectivamente que ilustra los insertos divididos de la mitad de troquel dividido en vista despiezada, el soporte de inserto dividido, y los insertos y el soporte en relación montada.

25 La figura 16 es una vista en perspectiva completamente despiezada del aparato de las figuras 13 y 14.

La figura 17 es un diagrama de flujo conceptual que ilustra una realización del método de la presente invención para optimizar la historia de presión-tiempo para un proceso PRF o análogos.

30 La figura 18A es un gráfico de la evolución de la deformación circunferencial y la deformación de grosor de un elemento, en análisis de elementos finitos de una pieza que experimenta formación por presión-pistón, cuando el elemento se mueve radialmente hacia fuera bajo la acción de la presión interna y la fuerza del pistón.

35 La figura 18B es un gráfico de la tasa de deformación plástica con respecto al mismo elemento.

La figura 19 es una vista fragmentaria de un troquel PRF que representa la posición de una sonda de continuidad ilustrativa.

40 La figura 20 es una vista en alzado en sección fragmentaria ampliada de la sonda de continuidad de la figura 19 montada en el troquel.

La figura 21 es una vista ampliada en sección transversal de la sonda de continuidad de la figura 19.

45 La figura 22 es un gráfico que ilustra un primer modelo de presión variada de una historia de presión-tiempo según la invención, representando la presión en función del tiempo, y que también representa un modelo de presión constante para comparación.

50 La figura 23 es un gráfico de las historias de tasa de deformación de los modelos de presión variada y constante de la figura 22.

La figura 24 es un gráfico que ilustra un segundo modelo de presión variada de una historia de presión-tiempo según la invención, representándose la presión en función del tiempo, y que también representa un modelo de presión constante para comparación.

55 La figura 25 es un gráfico de las historias de tasa de deformación de los modelos de presión variada y constante de la figura 24.

60 Las figuras 26A, 26B, 26C y 26D son vistas esquemáticas en alzado generadas por ordenador de la pieza y el troquel en iteraciones progresivas de modelado de elementos finitos del modelo de presión variada de la figura 22.

La figura 27 es un diagrama simplificado que ilustra un proceso PRF que realiza la invención.

65 Y las figuras 28, 29 y 30 son vistas en alzado en sección, similares a la figura 13 pero algo simplificadas, que ilustran un aparato de PRF modificado en etapas sucesivas en la realización de un proceso PRF modificado según la invención.

Mejores modos de llevar a la práctica la invención

Formación por presión-pistón

- 5 Para facilitar la explicación de las características nuevas de la presente invención, los métodos y el aparato de formación por presión-pistón hasta ahora descritos en dicha Patente de Estados Unidos número 6.802.196 se describirán inicialmente, con referencia a las figuras 1-16, que ilustran los métodos y el aparato de la solicitud en tramitación.
- 10 Más en concreto, el método y el aparato de la solicitud en tramitación se describirán realizados en métodos de formar envases de aluminio que tienen una forma contorneada que no tiene que ser axisimétrica (radialmente simétrica alrededor de un eje geométrico del envase) usando una combinación de hidroformación (presión de fluido interna, ya sea líquido o gas) y punzón, es decir, un procedimiento PRF.
- 15 El proceso de fabricación PRF tiene dos etapas distintas, la fabricación de una preforma y la posterior formación de la preforma al envase final. En la solicitud en tramitación se describen varias opciones para todo el recorrido de formación; la opción apropiada se determina por la formabilidad de la hoja de aluminio que se use.
- 20 La preforma se hace de hoja de aluminio (el término "aluminio" hace referencia aquí a aleaciones a base de aluminio así como metal aluminio puro) que tiene una microestructura recristalizada o recuperada y con un calibre, por ejemplo, en el rango de 0,25 mm a 1,5 mm (también se puede usar formación PRF para formar artículos huecos de metal de otros materiales, tal como acero). La preforma es un cilindro de extremos cerrados que se puede hacer, por ejemplo, por un proceso de estirado-reestirado o por extrusión hacia atrás. El diámetro de la preforma está en algún lugar entre los diámetros mínimo y máximo del envase producido deseado. Se puede formar roscas en la preforma antes de las operaciones de formación posteriores. El perfil del extremo cerrado de la preforma se puede diseñar para facilitar la formación del perfil inferior del producto final.
- 25 Como se ilustra en la figura 1, el conjunto de utillaje para el método de la invención incluye un troquel dividido 10 con una cavidad perfilada 11 que define una forma de botella axialmente vertical, un punzón 12 que tiene el contorno deseado para la parte inferior del envase (por ejemplo, como se ilustra, un contorno abovedado de forma convexa para impartir una forma abovedada a la parte inferior del envase formado) y un pistón 14 que está unido al punzón. En la figura 1, solamente se representa una de las dos mitades del troquel dividido, siendo la otra una imagen especular de la mitad de troquel ilustrada; como será evidente, las dos mitades se unen en un plano conteniendo el eje geométrico de la forma de botella definida por la pared de la cavidad de troquel 11.
- 30 El diámetro mínimo de la cavidad de troquel 11, en su extremo superior abierto 11a (que corresponde al cuello de la forma de botella de la cavidad) es igual al diámetro exterior de la preforma (véase la figura 2A) a colocar en la cavidad, con tolerancia para holgura. La preforma se coloca inicialmente ligeramente encima del punzón 12 y tiene un adaptador de presión representado esquemáticamente 16 en el extremo abierto 11a para permitir la presurización interna. La presurización se puede lograr, por ejemplo, por un acoplamiento a roscas formadas en el extremo superior abierto de la preforma, o insertando un tubo en el extremo abierto de la preforma y haciendo un cierre hermético por medio del troquel dividido o por algún otro adaptador de presión.
- 35 El paso de presurización implica introducir, al interior de la preforma hueca, un fluido tal como agua o aire a presión suficiente para hacer que la preforma se expanda dentro de la cavidad hasta que la pared de la preforma es empujada de forma sustancialmente completa contra la pared definitoria de cavidad de troquel, impartiendo por ello la forma y las dimensiones laterales de la cavidad a la preforma expandida. Indicado en términos generales, el fluido empleado puede ser compresible o no compresible, con cualquier masa, flujo, volumen o presión controlados para controlar la presión a la que se someten las paredes de la preforma. Al seleccionar el fluido, hay que tener en cuenta las condiciones de temperatura a emplear en la operación de formación; si el fluido es agua, por ejemplo, la temperatura debe ser inferior a 100°C, y si se precisa una temperatura más alta, el fluido deberá ser un gas tal como aire, o un líquido que no hierva a la temperatura de la operación de formación.
- 40 El paso de presurización implica introducir, al interior de la preforma hueca, un fluido tal como agua o aire a presión suficiente para hacer que la preforma se expanda dentro de la cavidad hasta que la pared de la preforma es empujada de forma sustancialmente completa contra la pared definitoria de cavidad de troquel, impartiendo por ello la forma y las dimensiones laterales de la cavidad a la preforma expandida. Indicado en términos generales, el fluido empleado puede ser compresible o no compresible, con cualquier masa, flujo, volumen o presión controlados para controlar la presión a la que se someten las paredes de la preforma. Al seleccionar el fluido, hay que tener en cuenta las condiciones de temperatura a emplear en la operación de formación; si el fluido es agua, por ejemplo, la temperatura debe ser inferior a 100°C, y si se precisa una temperatura más alta, el fluido deberá ser un gas tal como aire, o un líquido que no hierva a la temperatura de la operación de formación.
- 45 Como resultado del paso de presurización, las características en relieve detalladas formadas en la pared del troquel son reproducidas en forma de imagen especular inversa en la superficie del envase resultante. Aunque tales características, o la forma general, del envase producido no son axisimétricas, el envase se saca del utillaje sin dificultad debido al uso de un troquel dividido.
- 50 En la disposición específica ilustrada en las figuras 2A y 2B, la preforma 18 es una pieza de aluminio cilíndrica hueca con un extremo inferior cerrado 20 y un extremo superior abierto 22, que tiene un diámetro exterior igual al diámetro exterior del cuello de la forma de botella a formar, y las deformaciones de formación de la operación PRF están dentro de los límites establecidos por la formabilidad de la preforma (que depende de la temperatura y la tasa de deformación). Con una preforma que tiene esta propiedad de formabilidad, la forma de la cavidad de troquel 11 se realiza exactamente según sea preciso para el producto final y el producto se puede hacer en una sola operación PRF. El movimiento del pistón 14 y la tasa de presurización interna son tales que minimicen las deformaciones de la operación de formación y produzcan la forma deseada del envase. Los elementos de cuello y pared lateral resultan
- 55
- 60
- 65

primariamente de la expansión de la preforma debida a la presión interna, mientras que la forma de la parte inferior se define primariamente por el movimiento del pistón y el punzón 12, y el contorno de la superficie del punzón que mira al extremo cerrado 20 de la preforma.

5 La sincronización apropiada de la aplicación de presión de fluido interna y la operación (traslación a la cavidad de troquel) del pistón y punzón son importantes en la práctica de los métodos PRF. La figura 3 representa un gráfico de datos simulados generados por ordenador (secuencia de los resultados de los análisis de elementos finitos) que representan la operación de formación de las figuras 2A y 2B con presión de aire, controlada por flujo. Específicamente, el gráfico ilustra las historias de tiempo de presión y pistón implicadas. Como será evidente por la
10 figura 3, la presión de fluido dentro de la preforma tiene lugar en etapas sucesivas de (i) subir a un primer pico 24 antes de que comience la expansión de la preforma, (ii) caída a un valor mínimo 26 cuando comienza la expansión, (iii) ascenso gradual a un valor intermedio 28 a medida que prosigue la expansión hasta que la preforma esté en contacto extendido aunque no completo con la pared del troquel, y (iv) subida más rápida (en 30) a partir del valor intermedio durante la terminación de la expansión de la preforma. Indicado con referencia a esta secuencia de
15 etapas de presión, el inicio de la traslación del punzón para desplazar y deformar el extremo cerrado de la preforma tiene lugar preferiblemente (en 32) sustancialmente al final de la etapa (iii). Las unidades de tiempo, presión y desplazamiento del pistón se indican en el gráfico. El efecto de las operaciones representadas en la figura 3 en la preforma (en una simulación generada por ordenador) se representa en las figuras 6A, 6B, 6C y 6D para los tiempos 0,0, 0,096, 0,134 y 0,21 segundos como se representa en el eje x de la figura 3.

20 Al comienzo de la introducción de presión de fluido interna a la preforma hueca, el punzón 12 está dispuesto debajo del extremo cerrado de la preforma (suponiendo una orientación axialmente vertical del utillaje, como se representa) en relación muy próxima (por ejemplo, en contacto), con el fin de limitar el estiramiento axial de la preforma bajo la influencia de la presión interna suministrada. Cuando la expansión de la preforma logra un grado sustancial aunque
25 no totalmente completo, el pistón 14 es accionado de manera que desplace a la fuerza el punzón hacia arriba, desplazando el metal del extremo cerrado de la preforma hacia arriba y deformando el extremo cerrado al contorno de la superficie del punzón, cuando se completa la expansión lateral de la preforma por la presión interna. El desplazamiento hacia arriba del extremo cerrado de la preforma, en estas realizaciones descritas, no mueve la preforma hacia arriba con relación al troquel ni hace que la pared lateral de la preforma se combe (como podría ocurrir por una operación prematura hacia arriba del pistón) debido a la extensión de la expansión de la preforma
30 que ya se ha producido cuando el pistón comienza a empujar el punzón hacia arriba.

Una segunda realización del método PRF de dicha solicitud en tramitación se ilustra en las figuras 4A-4D. En esta
35 realización, como en la de las figuras 2A y 2B, la preforma cilíndrica 38 tiene un diámetro exterior inicial igual al diámetro mínimo (cuello) del producto final. Sin embargo, en esta realización se supone que las deformaciones de formación de la operación PRF exceden los límites de formabilidad de la preforma. En este caso, se requieren dos operaciones de formación por presión secuenciales. La primera (figuras 4A y 4B) no requiere un pistón y simplemente expande la preforma dentro de un troquel dividido simple 40 a una pieza de mayor diámetro 38a por
40 presurización interna. La segunda, un procedimiento PRF (figuras 4C y 4D), empieza con la pieza inicialmente expandida en el troquel 40 y, empleando un troquel dividido 42 con una cavidad en forma de botella 44 y un punzón 46 movido por un pistón 48, es decir, usando tanto presión interna como el movimiento del pistón, produce la forma de botella final deseada, incluyendo todas las características del perfil de pared lateral y los contornos de la parte inferior, que se producen primariamente por la acción del punzón 46.

45 Una tercera realización se representa en las figuras 5A y 5B. En esta realización, la preforma 50 se hace con un diámetro exterior inicial que es más grande que el diámetro exterior mínimo deseado (generalmente el diámetro del cuello) del envase final en forma de botella. Esta opción de preforma puede deberse a consideraciones de los límites de formación de la operación de preformación o se puede elegir para reducir las deformaciones en la operación PRF. En consecuencia, la fabricación del producto final debe incluir tanto expansión diametral como compresión de
50 la preforma y así no se puede realizar con el aparato PRF solo. Se usa una sola operación PRF (figura 5A, empleando el troquel dividido 52 y el punzón 54 movido por pistón) para formar la pared y los perfiles inferiores (como en la realización de las figuras 2A y 2B) y se precisa una formación de espín u otra operación de formación de cuello para formar el cuello del envase. Como se ilustra en la figura 5B, un tipo de procedimiento de formación de espín que se puede emplear es el expuesto en la Patente de Estados Unidos número 6.442.988, cuya descripción completa se incorpora aquí por esta referencia, utilizando múltiples conjuntos en tándem de discos de formación de
55 espín 56 y un mandril ahusado 58 para formar el cuello de botella 60.

En la práctica del procedimiento PRF descrito anteriormente, las deformaciones PRF pueden ser grandes. Consiguientemente, la composición de aleación se selecciona o ajusta para proporcionar una combinación de
60 propiedades del producto deseado y mejor formabilidad. Si todavía se precisa mejor formabilidad, la temperatura de formación se puede regular como se describe a continuación, dado que un aumento de la temperatura proporciona mejor formabilidad; por lo tanto, es posible que la o las operaciones PRF se tengan que realizar a temperaturas elevadas y/o la preforma puede requerir un recocido de recuperación, con el fin de aumentar su formabilidad.

65 La importancia de mover el punzón movido por pistón 12 a la cavidad de troquel 11 para desplazar y deformar el extremo cerrado 20 de la preforma 18 (como en las figuras 2A y 2B) se puede explicar mejor por referencia a la

figura 3 (mencionada anteriormente) considerada conjuntamente con las figuras 6A-6D, en la que la línea de puntos representa el perfil vertical de la cavidad de troquel 11, y el desplazamiento (en milímetros) del punzón con contorno de cúpula 12 en varios tiempos después de la iniciación de presión interna se representa por la escala en el lado derecho de dicha línea de puntos.

5 El pistón cumple dos funciones en la formación de la botella de aluminio. Limita las deformaciones por tracción axiales y forma la forma de la parte inferior del envase. Inicialmente el punzón movido por pistón 12 se mantiene en estrecha proximidad, o justo en contacto, con la parte inferior de la preforma 18 (figura 6A). Esto sirve para minimizar el estiramiento axial de la pared lateral de la preforma que de otro modo se produciría como resultado de la presurización interna. Así, cuando aumente la presión interna, la pared lateral de la preforma se expandirá para contactar el interior del troquel sin alargamiento significativo. En estas realizaciones descritas, la región central de la preforma se expandirá normalmente primero; esta región de expansión crecerá a lo largo de la longitud de la preforma, tanto hacia arriba como hacia abajo, y en algún punto en el tiempo la parte inferior de la preforma será de compresión casi semiesférica, con el radio del hemisferio aproximadamente igual al de la cavidad de troquel (figura 6B). En o justo antes de este punto del tiempo el pistón debe ser accionado para empujar el punzón 12 hacia arriba (figura 6C). El perfil del saliente del pistón (es decir, el contorno superficial del punzón) define completamente el perfil de la parte inferior del envase. Cuando la presión de fluido interna completa el moldeo de la preforma contra la cavidad de pared de troquel (compárese el hombro y el cuello de la botella en las figuras 6B, 6C y 6D), el movimiento del pistón, combinado con la presión interna, empuja la parte inferior de la preforma a los contornos de la superficie del punzón de una manera que produzca el contorno deseado (figura 6D) sin excesivas deformaciones por tracción que cabe pensar que podrían dar lugar a fallo. El movimiento hacia arriba del pistón aplica fuerzas de compresión a la región semiesférica de la preforma, reduce la deformación general producida por la operación de presurización, y ayuda a alimentar material radialmente hacia fuera para llenar los contornos del saliente del punzón.

25 Si el movimiento del pistón se aplica demasiado prematuramente, con relación a la tasa de presurización interna, es probable que la preforma se combe y pliegue debido a las fuerzas de compresión axiales. Si se aplica demasiado tarde, el material experimentará excesiva deformación en la dirección axial haciendo que falle. Así, la coordinación de la tasa de presurización interna y el movimiento del pistón y el saliente de punzón es precisa para una operación de formación exitosa. La temporización necesaria se lleva a cabo mejor por análisis de elementos finitos (AEF) del proceso. La figura 3 se basa en los resultados de AEF.

Hasta ahora se ha descrito el método PRF, y se ha ejemplificado en la figura 3, como si no se aplicase presión de fluido positiva (es decir, superatmosférica) al exterior de la preforma dentro de la cavidad de troquel. En tal caso, la presión externa en la preforma en la cavidad sería sustancialmente presión atmosférica ambiente. Cuando la preforma se expanda, el aire presente en la cavidad será expulsado (por la progresiva disminución de volumen entre el exterior de la preforma y la pared del troquel) a través de una abertura o paso de escape adecuado proporcionado para dicha finalidad y que comunica entre la cavidad de troquel y el exterior del troquel.

Con referencia específica a envases de aluminio, a modo de ilustración, AEF ha demostrado que, en ausencia de cualquier presión positiva externa aplicada, una vez que la preforma empieza a deformarse (fluir) plásticamente, la tasa de deformación en la preforma es muy alta y es esencialmente incontrolable, debido a la tasa de endurecimiento por trabajo baja o cero de las aleaciones de aluminio a la temperatura del proceso (por ejemplo aproximadamente 300°C) de la operación de formación por presión-pistón.

Es decir, a tales temperaturas, la tasa de endurecimiento por trabajo de las aleaciones de aluminio es esencialmente cero y la ductilidad (es decir, el límite de formación) disminuye con una tasa de deformación creciente. Así, la capacidad de hacer el envase producido con la forma final deseada se reduce a medida que la tasa de deformación de la operación de formación aumenta y la ductilidad del aluminio disminuye.

Según otra característica importante del método PRF, se aplica presión de fluido positiva al exterior de la preforma en la cavidad de troquel, simultáneamente con la aplicación de presión de fluido positiva al interior de la preforma. Estas presiones de fluido positivas exterior e interior las facilitan respectivamente dos sistemas de presión controlados independientemente. La presión de fluido positiva externa puede ser suministrada convenientemente conectando una fuente de presión de fluido positiva controlable independientemente a dicha abertura o paso de escape, con el fin de mantener una presión positiva en el volumen entre el troquel y la preforma en expansión.

Las figuras 7 y 8 comparan las historias de presión en función del tiempo y de deformación en función del tiempo para formar por presión-pistón un envase con y sin control de presión positiva externa (el término "deformación" se refiere aquí a elongación por unidad de longitud producida en un cuerpo por una fuerza externa). La línea 101 de la figura 7 corresponde a la línea designada "Presión" en la figura 3, para el caso donde no hay presión de fluido positiva externa que actúe en la preforma; la línea 103 de la figura 8 representa la deformación resultante para una posición (elemento) concreta determinada por AEF. Es claro que la deformación es casi instantánea en este caso, lo que implica tasas de deformación muy altas y tiempos muy cortos para expandir la preforma a contacto con la pared del troquel. En contraposición, las líneas 105, 107 y 109 de la figura 7 representan respectivamente presión de fluido positiva interna, presión de fluido positiva externa, y la diferencia entre las dos, cuando ambas presiones interna y externa son controladas, es decir, cuando se aplican simultáneamente presiones de fluido positivas externa e

- interna, independientemente controladas, a la preforma en la cavidad de troquel; la presión interna es más alta que la presión externa de modo que hay una diferencia de presión interna-externa positiva neta necesaria para llevar a cabo la expansión de la preforma. La línea 111 en la figura 8 representa la deformación circunferencial (deformación producida en el plano horizontal alrededor de la circunferencia de la preforma cuando se expande) para la condición de presión interna-externa controlada independientemente representada por las líneas 105, 107 y 109; se verá que la deformación circunferencial representada por la línea 111 llega al mismo valor final que el de la línea 103 pero en un tiempo mucho más largo y por ello a una tasa de deformación muy inferior. La línea 115 en la figura 8 representa deformación axial (deformación producida en la dirección vertical cuando la preforma se alarga).
- 5
- 10 Proporcionando simultáneamente presiones de fluido positivas interna y externa controlables independientemente que actúan en la preforma en la cavidad de troquel, y variando la diferencia entre dichas presiones interna y externa, la operación de formación permanece completamente bajo control, evitando tasas de deformación muy altas e incontrolables. La ductilidad de la preforma, y por ello el límite de formación de la operación, se incrementa por dos razones. Primera: la disminución de la tasa de deformación de la operación de formación incrementa la ductilidad inherente de la aleación de aluminio. Segunda: la adición de presión positiva externa disminuye (y potencialmente podría hacer negativo) el esfuerzo hidrostático en la pared de la preforma en expansión. Esto podría reducir el efecto perjudicial del daño asociado con microvacíos y las partículas intermetálicas en el metal. El término "esfuerzo hidrostático" se refiere aquí a la media aritmética de tres esfuerzos normales en las direcciones x, y y z.
- 15
- 20 La característica así descrita mejora la capacidad de la operación de formación por presión-pistón para hacer satisfactoriamente envases de aluminio en forma de botella y análogos, permitiendo el control de la tasa de deformación de la operación de formación y disminuyendo el esfuerzo hidrostático en el metal durante la formación.
- La selección de presión diferencial se basa en las propiedades del material del metal del que se hace la preforma. Específicamente, hay que considerar el límite elástico y la tasa de endurecimiento por trabajo del metal. Para que la preforma fluya plásticamente (es decir, inelásticamente), la presión diferencial debe ser tal que el esfuerzo efectivo (Mises) en la preforma exceda del límite elástico. Si hay una tasa positiva de endurecimiento por trabajo, un esfuerzo efectivo aplicado fijo (de la presión) superior al límite elástico haría que el metal se deformase a un nivel de esfuerzo igual a dicho esfuerzo efectivo aplicado. En ese punto, la tasa de deformación se aproximaría a cero. En el caso de una tasa de endurecimiento por trabajo muy baja o cero, el metal se deformaría a una tasa de deformación alta hasta llegar a contacto con la pared del molde (troquel) o que se produzca fractura. A las temperaturas elevadas anticipadas para el proceso PRF, la tasa de endurecimiento por trabajo de aleaciones de aluminio es de baja a cero.
- 25
- 30
- 35 Los ejemplos de gases adecuados para uso al suministrar las presiones tanto interna como externa incluyen, sin limitación, nitrógeno, aire y argón, y cualesquiera combinaciones de estos gases.
- La tasa de deformación plástica en cualquier punto en la pared de la preforma, en cualquier punto del tiempo depende solamente del esfuerzo efectivo instantáneo, que, a su vez, depende solamente de la presión diferencial. La opción de presión externa depende de la presión interna, con el principio general de lograr y controlar el esfuerzo efectivo, y por ello la tasa de deformación, en la pared de la preforma.
- 40
- La figura 9 representa un mecanismo de control diferente que puede ser usado en el proceso de formación. Se han usado simulaciones de elementos finitos para optimizar el proceso. En la figura 9, la línea 120 representa la presión interna (P_{in}) que actúa en la preforma, la línea 122 representa la presión externa (P_{out}) que actúa en la preforma, y la línea 124 representa la presión diferencial ($P_{diff} = P_{in} - P_{out}$). Esta figura representa la historia de presión de un método de control. En este caso, la masa de fluido en la cavidad interna se mantiene constante y la presión en la cavidad externa (fuera de la preforma) disminuye linealmente. En la simulación se incluyen también las propiedades del material dependientes de la tasa de deformación. Este último mecanismo de control se prefiere actualmente porque da lugar a un proceso más simple.
- 45
- 50
- La figura 10 se refiere a un método PFR donde se aplica a la preforma calentamiento que induce un gradiente de temperatura en la preforma. Como se representa en la figura 10, el punzón 12 está en contacto con la parte inferior de la preforma 18 y el punzón 12 contiene un elemento de calentamiento 19. Éste calienta la preforma de abajo arriba haciendo que la expansión de la preforma crezca de abajo arriba cuando aumente la presión interna.
- 55
- La figura 11 representa gráficos que ilustran el proceso de expansión. Una línea del gráfico representa los desplazamientos del pistón/punzón mientras que la otra representa las variaciones en la carga en el pistón/punzón, ambos en función del tiempo. Una tercera línea representa la presión interna en la preforma.
- 60
- 65 En el punto A el pistón se precarga a una carga de compresión de aproximadamente 22,7 kg, y en el punto B la preforma es presurizada internamente y se mantiene a un nivel de 1,14 MPa. En el procedimiento ilustrado, la posición del pistón se escalonó entre los puntos B y C para mantener una carga de compresión del pistón de 68 kg. Cuando la carga del pistón ya no disminuye rápidamente después de un incremento en la posición del pistón (punto C a D), la rampa del pistón continúa a un desplazamiento de aproximadamente 25 mm y una carga de aproximadamente 454 kg (punto E). Durante la rampa del pistón desde el punto D al punto E, el perfil inferior del envase se formó simultáneamente con la expansión de la preforma de modo que el punto E representa la

terminación de la formación del envase.

Aunque el gráfico de la figura 11 representa un procedimiento gradual, también es posible expandir y formar la preforma a un envase en una operación suave, por ejemplo utilizando un control computerizado del procedimiento. La ventaja de este procedimiento es que, debido al gradiente de temperatura inducido, la expansión prosigue gradualmente de abajo arriba cuando el pistón y el punzón suben. Se ha demostrado que esta técnica da lugar a formabilidad mejorada reducida en comparación con los métodos previamente descritos en los que la expansión tiene lugar de forma esencialmente simultánea en toda la longitud de la preforma.

Aunque la figura 10 representa un elemento de calentamiento solamente dentro del punzón 12, es posible proporcionar diferentes zonas de calentamiento para facilitar la formación. Por ejemplo, puede haber otro calefactor separado alrededor de la parte superior de la preforma así como más elementos calefactores separados dentro de las paredes laterales de la cavidad de troquel. Manipulando independientemente las temperaturas en cada una de estas zonas, se desarrollan historias de expansión óptimas para varios diseños de envase.

La figura 12 representa una secuencia típica en la fabricación de una preforma a partir de un disco plano. Se usa una técnica de estirado/reestirado estándar, siendo estirada primero la hoja de aluminio 70 a un cilindro de extremo cerrado poco profundo 71, que luego se reestira a un segundo cilindro 72 de diámetro más pequeño y pared lateral más larga. El cilindro 72 se reestira entonces para formar el cilindro 73, que se reestira para formar el cilindro 74. Se notará que el cilindro 74 tiene una configuración fina larga.

En las figuras 13-16 se ilustra una realización del aparato PRF de la solicitud en tramitación, para la realización de algunas realizaciones del método PRF para formar un recipiente de metal. Este aparato incluye un troquel dividido 210 con una cavidad perfilada 211 que define una forma de botella axialmente vertical; un punzón 212 contorneado para impartir una configuración inferior de envase deseada (que puede ser asimétrica), un pistón de refuerzo 214 para mover el punzón, y un pistón de sellado 216 para sellar el extremo superior abierto de la cavidad de troquel y de una preforma de envase de metal (por ejemplo aluminio) 218 cuando la preforma se inserta dentro de la cavidad como se representa en la figura 13, así como componentes adicionales e instrumentalidades descritos más adelante.

En el troquel dividido del aparato de las figuras 13-16, insertos primarios intercambiables 219 y secciones o insertos de perfil secundarios 221 y 223 encajan sobre la superficie interior de un soporte de inserto dividido 225 recibido en el elemento principal de troquel dividido 210. Estas secciones pueden servir como patrones, que tienen superficies interiores formadas con configuraciones en relieve (el término "relieve" se usa aquí para hacer referencia a relieve tanto positivo como negativo) para aplicar decoración o relieve al recipiente de metal cuando se forma. Cada inserto 219, 221 y 223 es propiamente un inserto dividido, formado en dos piezas separadas (219a, 219b; 221a, 221b; 223a, 223b) que están montadas respectivamente en las dos mitades de soporte de inserto dividido separadas 225a', 225b, que, a su vez, se reciben respectivamente en canales semicilíndricos opuestos axialmente verticales de las dos mitades de elemento de troquel principal dividido 210a, 210b.

Se alimenta gas al troquel a través de dos canales separados para presurización tanto interna como externa de la preforma. El suministro de gas al interior de la cavidad de troquel externamente a la preforma puede ser efectuado a través de orificios de acoplamiento en la estructura de troquel 210 y el soporte de inserto 225, desde los que hay una abertura o canal a la cavidad interior (por ejemplo) a través de un inserto 219, 221 o 223; tal abertura o canal producirá una característica superficial en el envase formado, y consiguientemente se coloca y configura de manera que no sobresalga, por ejemplo para constituir una parte del diseño de la superficie del envase. Se puede incorporar respectivamente dos grupos de elementos calefactores 227 y 229 bajo control independiente de la temperatura en las porciones superior e inferior del troquel, para proporcionar un gradiente de temperatura controlado durante la operación. Un elemento de calentamiento 231 está montado dentro de la preforma, coaxialmente con ella; este elemento de calentamiento puede eliminar la necesidad de precalentar el gas que se suministre al interior de la preforma para expandir la preforma. Se ha previsto otro elemento de calentamiento 233 para el pistón de refuerzo 214 (que por ello sirve como un medio para calentar el punzón), con un aro de aislamiento de temperatura 235 para evitar el sobrecalentamiento de la hidráulica y celdas de carga situadas en porciones adyacentes del equipo.

Las características anteriores del aparato de las figuras 13-16 permiten mayor rapidez en los cambios de troquel, reducidos costos de energía y mayores tasas de producción. Deseablemente, para una construcción y operación económicas, los únicos elementos calefactores proporcionados y usados puede ser el elemento coaxial 231 y el elemento de pistón de refuerzo 233.

Como también se ilustra en el aparato de las figuras 13-16, se puede formar roscas o lengüetas (para permitir la unión de un tapón de cierre roscado) y/o un aro de cuello en una porción de cuello del envase durante y como una parte del procedimiento PRF propiamente dicho, más bien que por un paso separado de formación del cuello, de nuevo para incrementar las tasas de producción. Esto se lleva a cabo creando una configuración negativo rosca o lengüeta negativa en la porción superficial interior del troquel dividido correspondiente al cuello del envase formado, de modo que cuando la preforma se expanda (en la región de cuello de la cavidad de troquel) se le imparta la configuración en relieve de rosca o lengüeta. Para dicha operación de formación de rosca, la preforma (o al menos

su porción de cuello) está dimensionada de manera que tenga menor diámetro que el cuello del envase formado final.

5 Con referencia especial a las figuras 14-16, el soporte de inserto está constituido por dos mitades especulares 225a, 225b teniendo cada una una superficie interior semicilíndrica axialmente vertical y generalmente semicilíndrica. El inserto primario 219 y los dos insertos divididos secundarios 221 y 223 están dispuestos en sucesión contigua en tándem a lo largo del eje de la cavidad de troquel, estando montada cada mitad de cada inserto secundario en una mitad del soporte de inserto dividido de modo que cuando las dos mitades del soporte de inserto se pongan conjuntamente en relación opuesta, las dos mitades de cada inserto dividido estén en correspondencia opuesta una con otra. Los insertos primario y secundario acoplan uno con otro en sus bordes horizontales 241, 243, 245 y tienen superficies exteriores que encajan con elementos tales como los salientes 247 formados en las superficies interiores de las mitades del soporte de inserto dividido. Los insertos constituyen conjuntamente toda la pared del troquel que define la forma del envase a formar.

15 Cada una de las mitades de inserto de perfil primario 219a y 219b tiene una superficie interior que define la mitad de la porción superior, incluyendo el cuello, de la forma deseada del envase, tal como una forma de botella. Como se ha indicado en 237 en la figura 13, la superficie de formación de cuello de cada mitad de este inserto dividido primario (en la realización ilustrada) está contorneada como una rosca de tornillo para impartir una rosca de tornillo de enganche de tapón al cuello del envase formado. El resto de la superficie interior del inserto dividido primario puede ser liso, para producir un envase de superficie lisa, o con textura para producir un envase con una aspereza superficial deseada o configuración repetida.

25 Una o ambas mitades de uno o ambos insertos de perfil secundario (superior e inferior) 221 y 223 puede tener una superficie interior configurada para proporcionar configuraciones en relieve positivas y/o negativas, diseños, símbolos y/o letras en la superficie del envase formado. Se facilitan ventajosamente múltiples conjuntos de insertos intercambiables, por ejemplo con características superficiales diferentes uno de otro, para uso al producir recipientes de metal formados con diseños o superficies correspondientemente diferentes. Entonces se puede efectuar cambios de utillaje muy rápidamente y simplemente sacando un conjunto de insertos de los soportes de inserto y colocando en su lugar otro conjunto de insertos que sea intercambiable con él.

30 El sellado entre componentes opuestos del troquel dividido se lleva a cabo mediante maquinado de precisión que elimina la necesidad de juntas estancas y aros.

35 En el aparato representado, el elemento de troquel dividido 210 es calentado por doce varillas calefactoras 249, cada una la mitad de la altura vertical del conjunto de troquel, insertadas verticalmente en el conjunto de troquel de arriba abajo, respectivamente. El control del calentamiento se coloca en dos zonas, superior e inferior, con sistemas de control de temperatura independientes (no representados) que permiten controlar el gradiente de temperatura en el troquel.

40 El gas para la presurización interna y externa de la preforma dentro de la cavidad de troquel puede ser pretratado pasando a través de dos canales separados en los dos bloques de contención de presión de componente (elemento de troquel dividido 210). El canal para presurización externa ventea a la cavidad de troquel, mientras que el canal para presurización interna ventea al interior de la preforma mediante el pistón de sellado 216, al que se distribuye gas a través de orificio de gas 250 del pistón de sellado.

45 El elemento de calentamiento 231 es una varilla o bayoneta de calentamiento montada en el pistón de sellado y situada coaxialmente con la preforma, que se extiende hacia abajo a la preforma, cerca de su parte inferior, a través del extremo superior abierto de la preforma, cuando el pistón de sellado está en su posición completamente bajada para la realización de un procedimiento PRF. El elemento 231 tiene su propio sistema de control de temperatura separado (no representado). Con esta disposición, se puede evitar el precalentamiento del gas, lo que permite eliminar el equipo de precalentamiento de gas y también evitar, al menos en gran parte, la necesidad de precalentar los componentes de troquel, dado que solamente la preforma propiamente dicha tiene que estar a temperatura elevada. El pistón de sellado, de forma análoga al pistón de refuerzo, está provisto de un aro de aislamiento de temperatura de cerámica 253 para evitar el sobrecalentamiento de la hidráulica y las celdas de carga adyacentes.

50 Como también se representa en las figuras 13 y 16, el aparato también está provisto de un adaptador de pistón de sellado hidráulico 255 y un adaptador de pistón de refuerzo hidráulico 257; un adaptador de aro de aislamiento-pistón de sellado 259; aro de pistón de sellado 261; y tapones de extremo superior e inferior de contención de presión 263 para cada mitad del elemento de troquel principal dividido 210.

60 Se podría usar un sistema de excéntrica como una alternativa a hidráulica para mover los pistones.

Optimización del proceso y control por ordenador

65 Tal como se emplea con procesos y aparatos de formación por presión-pistón de los tipos descritos anteriormente y en dicha solicitud en tramitación, la presente invención se refiere en un primer aspecto a métodos para la

optimización de las condiciones límite y el control por ordenador del proceso de formación. Las operaciones de PRF e hidroformación convencionales requieren la acción combinada de presión y movimiento de utillaje para expandir una preforma a una forma deseada. Con la tecnología actual, todas esas operaciones son controladas por ordenador, en el que se especifican la historia de presión-tiempo y el movimiento mecánico del utillaje.

La minimización del tiempo de proceso (ciclo) y el aseguramiento de las propiedades deseadas del producto requieren la optimización del proceso. Actualmente, las condiciones límite, $P(t)$, para una operación de hidroformación o PRF se determinan por experimentación y experiencia. No hay garantía de que tales condiciones sean óptimas con el fin de producir un producto en el tiempo mínimo del ciclo.

La presente invención implica optimizar las condiciones límite para un proceso por análisis de elementos finitos (AEF) y transferir la salida del AEF (específicamente, la historia de presión-tiempo) a la lógica de control de una máquina de laboratorio o taller. Indicado más ampliamente, usa AEF para optimizar un proceso, siendo transferida la salida del análisis para controlar una máquina.

La invención se refiere en este primer aspecto a definir una historia de presión-tiempo óptima y proporcionar realimentación desde el utillaje al ordenador de control de proceso. Es decir, la invención proporciona una definición óptima de las variables de proceso en operaciones de hidroformación tales como PRF a través de la definición de una historia de presión-tiempo que asegurará que una condición crítica dada no sea excedida y proporcionando realimentación en "tiempo real", mediante sensores de pared de troquel, al control por ordenador del proceso de formación.

Así, en este aspecto, la invención proporciona en general una forma de disminuir el tiempo de ciclo del proceso PRF, asegurando al mismo tiempo unas propiedades aceptables del producto y evitando fallos. Esto lo hace mediante "modelado de elementos finitos" del proceso para establecer una historia de presión-tiempo que optimizará la operación de formación y aplicará límites de fallo a variables seleccionadas tales como el grosor mínimo de pared o la tasa de deformación máxima, es decir, usando análisis de elementos finitos (AEF) para definir una historia de presión-tiempo óptima que luego pueda ser transferida al control de una máquina, tal como el aparato PRF, e incorporando sensores de termopar y/o continuidad en la pared del troquel y conectándolos mediante bucles de realimentación al sistema informático que controla el proceso de formación con el fin de proporcionar realimentación activa desde un conjunto de troquel al control por ordenador del proceso PRF.

El modelado de elementos finitos requiere un análisis de elementos finitos del proceso de formación que tiene ecuaciones de constitución del material que predicen fiablemente la dependencia de la temperatura y de la tasa de deformación de la deformación plástica. Se lleva a cabo análisis de elementos finitos con el fin de definir la historia de presión-tiempo que optimizará la operación de formación; para ello, hay que especificar una definición de un criterio de fallo. Los ejemplos de dicho criterio incluyen un grosor mínimo de pared, un componente de deformación máxima y una tasa de deformación máxima, más allá del que puede tener lugar fallo de la pieza. Las sondas activas (termopar y continuidad) incrustadas en la pared del troquel proporcionan realimentación al bucle de control por ordenador acerca del estado de la operación de formación.

Como se ha descrito anteriormente, el proceso PRF forma un envase a partir de una hoja usando una combinación de presión interna y el movimiento de un pistón para producir un envase a partir de una hoja laminada. Es un proceso en dos fases: primera: se hace una preforma a partir de la hoja usando tecnología de estampado o embutición profunda más o menos convencional; y segunda: la preforma se somete a presión interna a temperaturas elevadas para hacer que la preforma se expanda a un conjunto de troquel. Un troquel dividido y un pistón móvil o punzón contienen la preforma en expansión y le imparten la forma deseada después de la expansión al conjunto de troquel. La preforma se hace fluir, por presión interna y movimiento del pistón, sobre el contorno del pistón.

En la operación PRF, el pistón evita inicialmente un tipo de fallo por "estallido" (o prueba de abombamiento) cuando la presión interna fuerza la expansión de la preforma al troquel. En segundo lugar, el pistón completa la forma final del producto. Así, es esencial conocer cuándo "empujar" el pistón para formar los detalles de la parte inferior del envase que se forma.

El control de la presión interna es una variable crítica para evitar un fallo por "estallido" y para minimizar el tiempo de ciclo, de los que ambos son cruciales para aplicaciones comerciales de los dos procesos. Conocer cuándo cerrar el conjunto de troquel moviendo el pistón también es importante. Esta invención afronta el control de presión y el tiempo de movimiento del pistón mediante la utilización de simulación AEF por ordenador para optimizar la historia de presión-tiempo de la operación y la introducción de un nuevo sensor para detectar cuándo la preforma en expansión pasa por una posición dada en la pared del troquel.

El software de control usado para controlar el proceso PRF permite al operador combinar múltiples pasos de "rampa" o "retención" tanto para la presión interna (y opcionalmente la presión externa) como la posición del pistón durante el proceso PRF. El esfuerzo en la pared del envase en expansión aumenta rápidamente (para una presión interna fija) cuando la preforma se expande. Así, la tasa de deformación en la pared depende de la presión interna, el "diámetro" de la preforma expandida y la temperatura. La ductilidad, o alternativamente la deformación por fallo,

de la preforma depende sensiblemente de la tasa de deformación y la temperatura. Así, es esencial el control de la tasa de deformación máxima en todo momento durante el proceso PRF. Solamente se puede lograr un tiempo de ciclo óptimo (mínimo) por el control de presión para maximizar la tasa de expansión de la preforma manteniendo al mismo tiempo la ductilidad de la preforma con el fin de permitir que la preforma llegue a las paredes del troquel sin fallo.

Con referencia al uso de la tasa de deformación como un criterio de fallo, la optimización del proceso PRF implica determinar el perfil de presión que minimizará el tiempo de proceso (ciclo) manteniendo al mismo tiempo la tasa de deformación suficientemente baja, en cada posición en la preforma, de modo que no se produzca fallo. La tasa de deformación depende no solamente de la temperatura y la presión, sino también del grado de expansión y por ello del adelgazamiento de pared. A diferencia del AEF convencional, que permite imponer un perfil de presión predefinido dependiente del tiempo como una condición límite y luego permite calcular la expansión de la preforma para un perfil de temperatura dado en ella, la optimización del proceso PRF requiere un cálculo de la historia de presión-tiempo que dará el tiempo mínimo para completar una operación PRF dentro de las limitaciones de ductilidad (y fallo) que son dependientes de la temperatura y la tasa de deformación.

Es decir, hay que calcular las condiciones límite que producirán un producto en un tiempo mínimo, para PRF, para conocer la historia de presión-tiempo interna que formará un producto en un tiempo mínimo sin fallo. Para ello, hay que asumir que las deformaciones de límite, en función de la temperatura y la tasa de deformación, son conocidas. Los datos de prueba de tracción en función de la temperatura y la tasa de deformación pueden proporcionar una primera estimación. Los datos de prueba de tensión del abombamiento elíptico y la deformación plana (a temperaturas elevadas) son mejores, cuando los procesos PRF tienen recorridos de deformación que pueden ser simulados mediante tales pruebas. En una buena primera aproximación, esto significa simplemente que el proceso no debe exceder una tasa de deformación máxima dada (que depende de la temperatura) en cada posición en la pared de la preforma cuando se expande al troquel. Entonces, hay que definir la historia de presión-tiempo que cumplirá el objetivo.

El problema a resolver es determinar la presión máxima que se puede aplicar, en cualquier tiempo a lo largo de la ruta de proceso, sin producir fallo. La salida de dicho análisis es un perfil de la presión interna en función del tiempo, la temperatura de proceso dada y las propiedades del material (sin conocimiento de las dependencias de la temperatura y la tasa de deformación de la plasticidad del material del que se hace la preforma, el análisis sería de poco o nulo uso).

Dado que el objetivo es definir una historia de presión-tiempo que no produzca una tasa de deformación plástica superior a un valor dado, se podría elegir diez incrementos en el tiempo desde el inicio al fin y calcular la presión para cada incremento de la siguiente manera: por cada incremento, se calcula la presión máxima que puede ser aplicada sin producir fallo. Ello requiere una serie de análisis de elementos finitos convencionales, con una presión creciente en cada uno. La presión máxima así obtenida, antes del fallo, es un punto en el gráfico de presión-tiempo. La malla deformada y las "variables de estado" del metal de este paso son las condiciones iniciales para el paso siguiente, que de nuevo impone un conjunto de condiciones de presión y determina la deformación límite (fallo). Mediante este procedimiento se obtiene un gráfico de presión en función del tiempo que optimiza el proceso y minimiza el tiempo de ciclo. Esta curva $P(t)$ puede ser aplicada posteriormente a un proceso PRF real. La figura 17 es un diagrama de flujo conceptual del método de optimización.

La figura 18A representa la evolución de la deformación circunferencial y la deformación de grosor de un elemento cuando el elemento se mueve radialmente hacia fuera bajo la acción de la presión interna y la fuerza del pistón. La tasa de deformación plástica para el elemento se representa en la figura 18B. Si se supone que tiene lugar fallo cuando se supera una tasa de deformación crítica (como indica la línea horizontal), es evidente que el "fallo" se habrá producido en aproximadamente 18,6 s.

En el AEF, hay una búsqueda a través de todos los elementos, en cada incremento de tiempo, para determinar cuándo se producirá un fallo. Después de hallar dicho punto, se retrocederá 2 o 3 incrementos en el tiempo de proceso y reanudará el AEF del proceso a una presión más baja a partir del "estado" en el nuevo tiempo de inicio del proceso. El valor almacenado será utilizado más tarde para el control del proceso real.

Son importantes las apropiadas ecuaciones de constitución, que capturan las sensibilidades de la temperatura y la tasa de deformación del esfuerzo de flujo de la hoja, y la evaluación experimental de los límites de formación, a temperaturas, tasas de deformación y recorridos de deformación apropiados.

El gradiente de temperatura, impuesto en la preforma antes de aplicar la presión que producirá la expansión a la pared de troquel, asegura que el proceso prosiga desde el extremo caliente al más frío de la preforma (o en cualquier configuración deseada dependiendo del gradiente impuesto). Sondas de continuidad incrustadas en la pared del troquel pueden rastrear la interfaz de avance. Un ejemplo de tal sonda, designada 300, se representa en las figuras 19, 20 y 21. Se hace de alambre fino 301, rodeado concéntricamente por un agente sellante de cerámica 302 y un tubo de cerámica 303, y se coloca a través de la pared del troquel 304 de tal manera que su presencia no pueda ser observable en la pared del envase PRF final. La información acerca del progreso del frente de contacto

puede ser usada después como entrada adicional para el control por ordenador del proceso PRF. Por ejemplo, las decisiones relativas a las variables de proceso se pueden tomar en respuesta a la entrada activa más bien que estar predefinidas simplemente en el software que controle el proceso.

5 El análisis de elementos finitos para optimizar el proceso PRF, para una geometría dada del producto, requiere una serie de análisis. El primero establece la presión inicial que se ha de aplicar a la preforma no deformada. Los análisis segundo y siguientes tienen la finalidad de definir la historia de presión-tiempo que minimizará el tiempo de proceso total, mientras permanece dentro de los límites de un criterio de fallo. Suponiendo a efectos de ilustración que una tasa de deformación máxima definirá "fallo" si, durante la presurización o la expansión de la preforma, la tasa de deformación en cualquier posición en la preforma en expansión excede de un valor crítico dado, se producirá fallo. La tasa de deformación crítica puede ser determinada a partir técnicas de prueba de tracción, abombamiento u otras pruebas mecánicas que puedan establecer fallo en función de la temperatura y el recorrido de deformación. El primer análisis aplica simplemente una condición de carga de rampa de presión a la preforma, por ejemplo, en un tiempo de un segundo, a presiones sucesivamente más altas, hasta que se alcance (por ejemplo) 90% de la tasa de deformación crítica. Este valor de presión, P_1 , sería la condición de carga del primer paso de un proceso AEF polietápico para producir un producto en un tiempo mínimo. Los análisis restantes son calculados por una serie de "tareas", siendo la forma y el "estado" salidos de uno la entrada al siguiente. La condición de límite de presión se reducirá, por ejemplo, 10% para cada tarea sucesiva y el análisis se repetirá. De esta manera se obtendría un gráfico de presión en función del tiempo de proceso que garantizará que no se alcance una tasa de deformación crítica (y por ello el fallo) durante la operación de formación.

En resumen, la salida lógica y AEF del informe es la siguiente:

25 Paso inicial: determinar la presión máxima que puede ser aplicada a la preforma (no deformada). Presión en rampa hasta que se alcance la tasa de deformación máxima permisible por ejemplo, $0,1 \text{ s}^{-1}$). Retorno para definir el esfuerzo para el primer paso, a presión constante.

Pasos siguientes y posteriores:

- 30 (a) aplicar presión;
- (b) supervisar la tasa de deformación (criterio de fallo) cuando la preforma se expande: definir la condición crítica;
- 35 (c) disminuir la presión;
- (d) ir a (a).

40 Una técnica específica de optimización/control para tiempo de ciclo decreciente (desde actualmente aproximadamente 20 segundos a aproximadamente 4 segundos, por ejemplo) implica aplicar una serie rápida de secuencias de repetición durante la que la deformación primero se incrementa a un punto justo por debajo del límite de fallo y luego cae de nuevo a un valor más bajo, que da a la curva de la tasa de deformación una configuración de dientes de sierra. Actualmente, se usa una tasa baja de presión constante para expandir la preforma.

45 Para ilustrar mejor un procedimiento de análisis para desarrollar dicha historia de presión-tiempo, supóngase que una tasa de deformación superior a $0,2 \text{ s}^{-1}$ producirá una hendidura (fallo) en una pieza concreta. Para maximizar la tasa de deformación mientras permanece por debajo del valor crítico, se realizan análisis de elementos finitos iterativos en una preforma, con un incremento de tiempo dado e incrementos de presión progresivos, hasta que se alcanza una presión a la que la tasa de deformación crítica se supera al menos con respecto a un elemento. El valor de presión se reduce, y los análisis de elementos finitos se continúan a la segunda presión más baja para incrementos de tiempo hasta que la tasa de deformación crítica sea superada de nuevo. Estos pasos se repiten para desarrollar una historia de presión-tiempo completa para la expansión de la preforma desde sus dimensiones iniciales a la pared del troquel.

55 Un ejemplo de dicha historia de presión-tiempo desarrollada por AEF se representa en la figura 22, y la historia de tasa de deformación correspondiente se representa en la figura 23. La figura 22 compara un modelo de presión variada según la presente invención con un modelo de presión constante como el usado hasta ahora. En el modelo de presión variada, la presión de fluido interna neta en la preforma se incrementa de 0 a 200 psi en el primer segundo, y se mantiene a 200 psi durante cuatro segundos aproximadamente; durante este incremento de tiempo, la tasa de deformación máxima (figura 23) de cualquier elemento alcanza inicialmente un pico de al menos $0,14 \text{ s}^{-1}$, cae cuando la preforma comienza a expandirse, y luego se eleva al valor limitativo de $0,2 \text{ s}^{-1}$ al final de los cuatro segundos. La presión se reduce en seis pasos de aproximadamente 10 psi cada uno y se mantiene durante una fracción de segundo en cada paso; la tasa de deformación máxima cae bruscamente con cada disminución de presión, pero luego se eleva rápidamente al valor limitativo. Sin embargo, la secuencia de caídas de presión evita que la tasa de deformación máxima supere el valor limitativo. En aproximadamente seis segundos, con la presión a aproximadamente 140 psi, la pieza llega a la pared del troquel.

En contraposición, con el modelo de presión constante, el aumento inicial de presión se detiene solamente a 140 psi en un segundo y la presión se mantiene a dicho nivel (para evitar una tasa de deformación excesiva) hasta que la pieza llegue a la pared del troquel después de aproximadamente 18 segundos. Incluso así, la figura 23 representa que la tasa de deformación máxima para el modelo de presión constante está justo por encima del valor limitativo cuando la pieza llega a la pared del troquel.

La gran disminución del tiempo de ciclo proporcionada por el modelo de presión variable es atribuible a las presiones iniciales y posteriores significativamente más grandes (incluso aunque disminuyan) que permite la variación gradual de las condiciones de presión-tiempo, mientras que las disminuciones de presión repetidas evitan que la tasa de deformación máxima supere el valor limitativo, como representa la configuración de dientes de sierra de la figura 23.

Otro ejemplo, con el modelo de presión variada que logra una presión inicial máxima de 250 psi, se representa en las figuras 24 (presión en función del tiempo) y 25 (tasa de deformación máxima en función del tiempo). Los resultados son similares, aunque el tiempo de ciclo se reduce más, como pone de manifiesto el hecho de que la pieza llega a la pared del troquel en cuatro segundos solamente. El mismo modelo de presión constante se incluye en las figuras 24 y 25 para comparación.

Las figuras 26A, 26B, 26C y 26D muestran cuatro iteraciones en el desarrollo del modelo de presión variada de las figuras 22 y 23 por análisis de elementos finitos. La primera iteración, en la figura 26A, representa el logro de la tasa de deformación máxima a la primera presión (más alta). Las otras representan los incrementos de tiempo tercero, quinto y séptimo, siendo el último aquel en el que la pieza llega a la pared del troquel.

La figura 27 es un diagrama simplificado que ilustra una realización de la invención aplicada al control de un proceso de formación por presión-pistón, para optimizar la historia de presión-tiempo, es decir, para reducir o minimizar el tiempo de ciclo, incrementando por ello la velocidad de producción. En la figura 27, el troquel 10, el punzón 12, el pistón 14 y el adaptador de presión 16 pueden ser esencialmente los representados en las figuras 1-2B, para convertir una preforma (no representada en la figura 27) tal como la preforma 18 de la figura 2A en un envase. Un ordenador 320 controla el suministro de presión de fluido interna a través del adaptador 16 a la preforma dentro del troquel, así como la traslación del pistón 14 para mover el punzón y la operación de uno o más elementos calefactores (no representados) en el troquel y/o el conjunto de pistón-punzón para someter la preforma a condiciones de temperatura seleccionadas o predeterminadas durante la formación, por ejemplo como se ha descrito anteriormente con referencia a la figura 10. La información de temperatura es transmitida al ordenador como indican las líneas 322 desde uno o más termopares (no representados) dentro del troquel y/o dentro del pistón o punzón.

Una sonda de continuidad (no representada en la figura 27, pero del mismo tipo que la sonda 300 ilustrada en las figuras 19-21) está dispuesta en el troquel, expuesta en la pared del troquel, y como se ha indicado en 324 está conectada al ordenador. Cuando la preforma en expansión dentro del troquel llega a la pared del troquel en la posición de la sonda, al ordenador se le indica que la preforma ha alcanzado la pared del troquel en la posición de la sonda expuesta. El control por ordenador de las operaciones de proceso es sensible a la información así recibida del termopar y/o la sonda de continuidad.

El ordenador controla la presión de fluido interna neta suministrada de conformidad con una historia de presión-tiempo optimizada predeterminada. A partir de parámetros seleccionados tales como la configuración de la preforma, las dimensiones y las propiedades del material así como las condiciones de temperatura aplicadas a la preforma y la forma y dimensiones definidas del envase a formar, se determina un criterio de fallo (por ejemplo, el valor limitativo de la tasa de deformación), que, si se supera, daría lugar a fallo tal como un agujero o hendidura en el artículo producido, y se realizan análisis de elementos finitos iterativos para desarrollar una historia de presión-tiempo optimizada 332 que defina las condiciones límite de presión-tiempo dentro de las que el criterio de fallo no se superará, y por lo tanto no se producirá fallo, en ninguna posición o elemento de la preforma, durante todo el proceso de formación por presión-pistón. Esta historia de presión-tiempo puede ser del tipo representado en la figura 22 o 24. Se suministra a la lógica de control del ordenador 320, que entonces controla las condiciones de presión en el proceso de acuerdo con ella.

Es decir, al inicio del proceso de formación por presión-pistón, con la preforma dispuesta en el troquel como en la figura 2A y la posición inicial del punzón y las condiciones térmicas establecidas, el ordenador hace que la presión de fluido interna neta dentro de la preforma aumente rápidamente (típicamente, dentro de un segundo) a un valor máximo inicial, y que se mantenga a dicho valor durante un intervalo de tiempo predeterminado relativamente breve, durante el que la tasa de deformación plástica máxima (en cualquier posición o elemento en la preforma) se eleva inicialmente a un valor por debajo del valor limitativo (criterio de fallo), cae cuando la preforma comienza a expandirse, y se eleva de nuevo acercándose al valor limitativo. Antes de que la tasa de deformación exceda del valor limitativo, el ordenador hace que la presión se reduzca a un nivel algo más bajo, y que se mantenga a dicho nivel durante un segundo intervalo. La tasa de deformación cae con la reducción de presión, pero se eleva rápidamente aproximándose al valor limitativo una vez más; el ordenador reduce más la presión, y así por sucesivos decrementos de presión, e intervalos de mantenimiento de presión suficientemente cortos para limitar los aumentos

de la tasa de deformación, todo ello conforme a la historia de presión-tiempo suministrada, pero la formación por presión-pistón se completa sin fallo en un tiempo de ciclo ventajosamente corto.

5 Hay una historia de presión-tiempo óptima que dará un tiempo de ciclo mínimo para la forma y aleación de cada envase. El proceso de la invención puede ser usado con todas las realizaciones y modificaciones de la formación por presión-pistón descritas anteriormente, y también con otras modificaciones. Cuando se aplica tanto presión interna como externa a la preforma, y se controla independientemente, el ordenador controla ambas presiones según una historia de presión-tiempo suministrada desarrollada por análisis de elementos finitos iterativos de la manera descrita. En sus aspectos más amplios, la invención se puede aplicar a otros procedimientos de formación por presión, incluyendo también hidroformación convencional.

Formación activa por pistón de sellado - pistón de presión

15 Las figuras 28, 29 y 30 son vistas similares a la figura 13, pero considerablemente simplificadas, que ilustran una realización de un proceso PRF modificado según otro aspecto de la invención. En este proceso modificado, un pistón de sellado superior 416 (correspondiente en otros aspectos al pistón de sellado 216 de la figura 13) es móvil, durante el proceso PRF, mientras que el punzón inferior 412 y el pistón inferior 414 son estáticos. En una realización alternativa, ambos pistones 416 y 414 realizan movimiento simultáneo durante la formación, mientras que en otra realización el punzón inferior y el pistón se omiten totalmente y la parte inferior de la cavidad de troquel está cerrada por porciones inferiores de un troquel estático. El pistón de sellado superior 416 está fijado a y es móvil con una porción de troquel móvil superior 419 que desliza (en direcciones a lo largo del eje de la cavidad de troquel) dentro de una indentación ampliada 420 en la estructura de troquel principal 425 durante el proceso de formación. La preforma 421 y el pistón de sellado 416 son sujetados rígidamente por el troquel móvil 419.

25 En el aparato ilustrado, la pared interior 425a de la porción inferior de la estructura de troquel, debajo de la indentación 420, constituye una porción inferior fija de la pared del troquel que define la cavidad de troquel 411, adyacente al extremo cerrado de la cavidad proporcionado por el punzón-pistón estático 412-414, mientras que la pared lateral interior 419a de la pared de troquel móvil 419 constituye una porción móvil superior de la pared que define la cavidad de troquel. Los troqueles son típicos o preferiblemente troqueles divididos como en el caso del aparato descrito anteriormente. El pistón de sellado puede llevar una bayoneta calefactora 431 que se extiende al interior de la preforma 421; se introduce gas u otro fluido que proporcione presión de fluido interna neta al interior de la preforma a través de la porción de pistón de sellado.

35 En la realización de las figuras 28-30, en la que las disposiciones de calentamiento pueden ser las descritas para el aparato de la figura 13, la expansión de la preforma comienza en la parte inferior (en contacto con la estructura de pistón estático calentada 412-414) y se completa justo cuando el movimiento del conjunto de pistón de sellado-troquel móvil 416-419 que sujeta la preforma es parado por el saliente inferior 420a de la porción dentada. Una sonda de contacto 300 del tipo descrito anteriormente detecta el contacto de la preforma en expansión con una posición seleccionada en la pared del troquel 430 y coordina el movimiento final del conjunto y la terminación del proceso de formación.

45 Este proceso puede ser usado como una alternativa al proceso PRF descrito en dicha solicitud en tramitación para formar envases conformados a partir de hoja metálica. En los principios básicos es similar en general a la tecnología PRF mostrada allí descrita, pero difiere con respecto al gradiente de temperatura requerido y los movimientos del pistón inferior 414 y el pistón de sellado 416. En PRF convencional, el pistón inferior se mueve para evitar un fallo de "estallido" y para impartir el perfil inferior deseado. En la realización de las figuras 28-30, el pistón inferior 414 está fijo y es pasivo, y el pistón de sellado superior 416 realiza todas las funciones de control, incluyendo mantener el contacto con el punzón de pistón inferior 412 para evitar el fallo por estallido.

50 El proceso y aparato de las figuras 28-30 proporcionan límites fijos (en concreto, el límite definido por el saliente 420a) para el movimiento del utillaje, específicamente el pistón de sellado, y así quita parte de la incertidumbre asociada con la posición del pistón en el proceso PRF convencional. También proporciona un sensor de pared para detectar la posición de la preforma en expansión y activar (mediante control por ordenador) el movimiento del troquel móvil a su posición final. El control de la presión de fluido interna neta puede ser efectuado según la presente invención de la manera descrita anteriormente con referencia a las figuras 17-27.

60 La figura 28 representa el aparato en la condición inicial, descansando la preforma 421 en el punzón de pistón inferior 412 y el troquel móvil 419 y el pistón de sellado 416 en sus posiciones más altas. El proceso comienza cuando se aplica presión interna a través del pistón de sellado a la preforma. Simultáneamente, el pistón de sellado 416 y el troquel móvil 419 comienzan a bajar a una tasa preprogramada, manteniendo una carga axial en la preforma.

65 La figura 29 representa el proceso a aproximadamente 75% de la terminación. El pistón de sellado y el troquel móvil asociado han bajado y la preforma se ha expandido debido a la presión interna. Dado que la temperatura de la preforma es más alta en la parte inferior, el proceso de expansión se inicia allí y sube por la pared del troquel. En la etapa representada en la figura 29, la sonda todavía no ha detectado el paso de la preforma en expansión.

La figura 30 representa la posición final y una botella totalmente formada. Cuando la preforma en expansión haya pasado por la sonda de contacto 300, habrá enviado al ordenador de control una señal que podría haber sido usada para indicar al troquel móvil 419 que se desplace rápidamente a su posición final.

5

Mejora de las propiedades del producto

En el proceso de formación en dos fases descrito en dicha solicitud en tramitación con referencia a las figuras 4A-4D explicadas anteriormente, primero se expande parcialmente una preforma en un troquel estático y la formación final es un proceso PRF que tiene lugar en un segundo molde con un pistón móvil.

10

Alternativamente, y en al menos algunos casos preferiblemente, dicho proceso de dos pasos puede ser realizado de una forma que sea la inversa de dicho procedimiento; es decir, el proceso PRF puede ser realizado como un primer paso, realizándose la formación final en un molde estático. Esto funciona especialmente bien cuando el primer paso es a temperatura elevada, y el segundo paso es a temperatura ambiente para inducir endurecimiento por deformación en las paredes del envase. Opcionalmente, el segundo paso también puede emplear un pistón móvil, dependiendo del diseño del envase u otro artículo hueco de metal a formar, y la aleación usada para hacer la preforma.

15

En otras realizaciones de la invención, la preforma se hace de una aleación de endurecimiento por precipitación, tal como una aleación de AlMgSi, y experimenta solamente un solo paso del ciclo PRF, reforzándose posteriormente las paredes laterales por endurecimiento por envejecimiento natural o artificial.

20

Es decir, las propiedades mecánicas de un artículo formado por presión-pistón tal como un envase, inmediatamente después de la operación de formación, pueden ser insuficientes con respecto a la carga axial (relacionada con la capacidad de formar un cierre de corona) o a la inversión de cúpula (relacionada con la presión interna). Para rectificar la situación, el envase se puede formar primero parcialmente a temperaturas elevadas por un proceso PRF y posteriormente expandirse a temperatura ambiente a la forma final deseada, requiriendo posiblemente de nuevo un pistón como para la operación a temperatura alta. De esta manera, se produce un estado de trabajo en frío en el metal y la resistencia se incrementa de forma significativa.

25

30

Una segunda opción es usar una aleación de endurecimiento por precipitación para la preforma, con modificación apropiada del proceso de fabricación de la preforma para acomodar el cambio en la relación de estiramiento límite; el proceso PRF prosigue entonces esencialmente como con la práctica actual. A las temperaturas del proceso PRF, el soluto está totalmente en solución sólida. Al enfriarse después del proceso PRF, tiene lugar cierta precipitación y la resistencia del envase aumenta. Dependiendo de la cinética de la precipitación, un envejecimiento natural a temperatura ambiente o un envejecimiento forzado a una temperatura modestamente elevada lograría una resistencia más alta y mejores propiedades del producto PRF. Las aleaciones de aluminio Mg-Si, que producen precipitados de Mg₂Si, son ejemplos de aleaciones para aplicaciones PRF.

35

40

Se ha de entender que la invención no se limita a los procedimientos y las realizaciones específicamente expuestos anteriormente, sino que se puede llevar a la práctica en otras formas dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

45

REIVINDICACIONES

1. Un método ejecutado por un sistema informático como parte de un programa implementado por ordenador para optimizar la historia de presión-tiempo para un proceso para formar una pieza (38a) a partir de una preforma de metal hueca inicial (18, 38) a un artículo hueco de metal dentro de un troquel (10, 40, 210, 419) sometiendo la pieza a presión de fluido interna neta de tal manera que la pieza se expanda a contacto con una pared de definición de forma del artículo del troquel (10, 40, 210, 419), evitando al mismo tiempo el fallo de la pieza, incluyendo los pasos de
- 5
- 10 (a) seleccionar un conjunto de parámetros del proceso incluyendo la temperatura y las propiedades del material de la preforma y las dimensiones;
- (b) determinar, a partir de dicho conjunto de parámetros, al menos un criterio de fallo que limita las condiciones de presión-tiempo a las que la pieza puede ser sometida sin fallo; y
- 15 (c) realizar iterativamente análisis de elementos finitos en la pieza, en base al conjunto de parámetros seleccionado y el criterio de fallo determinado, en cada uno de una pluralidad de valores diferentes de condiciones de presión-tiempo (P, t), para determinar condiciones límite de presión-tiempo (P_b , t_b) para el proceso,
- 20 donde cada valor de las condiciones de presión-tiempo incluye un valor de presión de fluido interna neta (P) y un intervalo de tiempo (t) durante el que el valor de presión de fluido interna neta mencionado en último lugar es aplicado a la pieza.
2. Un método según la reivindicación 1, donde dicho criterio de fallo se selecciona a partir del grupo que consta de
- 25 mínimo grosor de pared, deformación y tasa de deformación.
3. Un método según la reivindicación 1, donde el paso (c) incluye seleccionar un intervalo de tiempo y realizar iterativamente dichos análisis de elementos finitos en la pieza en cada uno de una pluralidad de valores de presión diferentes, para determinar, como una condición límite, un valor de presión de fluido interna neta máxima al que la
- 30 pieza puede ser sometida durante dicho intervalo de tiempo sin fallo.
4. Un método según la reivindicación 1, incluyendo
- 35 en el paso (a) seleccionar un primer conjunto de parámetros del proceso incluyendo la temperatura y las propiedades del material de la preforma y las dimensiones;
- en el paso (b) determinar, a partir de dicho primer conjunto de parámetros, al menos un primer criterio de fallo que limita las condiciones de presión-tiempo a las que la pieza puede ser sometida sin fallo;
- 40 en el paso (c) realizar iterativamente análisis de elementos finitos en la pieza, en base al primer conjunto de parámetros y el primer criterio de fallo determinado, en cada uno de una pluralidad de valores diferentes de condiciones de presión-tiempo (P, t), para determinar primeras condiciones límite de presión-tiempo (P_{b1} , t_{b1}) para el proceso; incluyendo además el método los pasos de
- 45 (d) determinar un segundo conjunto de parámetros del proceso correspondientes a dicho primer conjunto de parámetros del proceso pero modificados por deformación impuesta en la pieza por sujeción a dichas primeras condiciones límite de presión-tiempo (P_{b1} , t_{b1}); y
- 50 (e) repetir los pasos (b) y (c) para determinar, a partir de dicho segundo conjunto de parámetros del proceso, al menos un segundo criterio de fallo y para determinar, realizando iterativamente análisis de elementos finitos en base al segundo conjunto de parámetros y el segundo criterio de fallo determinado, segundas condiciones límite de presión-tiempo (P_{b2} , t_{b2}) para el proceso.
5. Un método según la reivindicación 4, incluyendo repetir los pasos (d) y (e) para determinar una pluralidad n de
- 55 condiciones límite de presión-tiempo donde $3 < n$; y donde, para cada entero i tal que $3 \leq i \leq n$, el i-ésimo conjunto de parámetros del proceso corresponde al (i-1)ésimo conjunto de parámetros del proceso pero modificados por deformación impuesta a la pieza por sujeción a las (i-1)ésimas condiciones límite de presión-tiempo (P_{bi-1} , t_{bi-1}), el i-ésimo criterio de fallo se determina a partir del i-ésimo conjunto de parámetros del proceso, y las i-ésimas condiciones límite de presión-tiempo (P_{bi} , t_{bi}) son determinadas por análisis de elementos finitos realizados
- 60 iterativamente en base al i-ésimo conjunto de parámetros y el i-ésimo criterio de fallo determinado, para determinar por ello n conjuntos sucesivos de condiciones límite de presión-tiempo ($\{P_{b1}, t_{b1}\}, \dots, \{P_{bn}, t_{bn}\}$) que constituyen colectivamente una historia de presión-tiempo optimizada para dicho proceso.
6. Un método según la reivindicación 5, donde al menos un conjunto de condiciones límite de presión-tiempo se
- 65 determina por análisis de elementos finitos realizados iterativamente como se ha indicado en cada uno de una pluralidad de valores de presión (P) para un valor de tiempo preseleccionado (t).

7. Un método según la reivindicación 5, donde al menos un conjunto de condiciones límite de presión-tiempo se determina por análisis de elementos finitos realizados iterativamente como se ha indicado en cada uno de una pluralidad de valores de tiempo (t) para un valor de presión preseleccionado (P).
8. Un proceso para formar un artículo hueco de metal de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo los pasos de
- (a) disponer una preforma hueca de metal (18, 38) que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel (11, 44, 211, 411) lateralmente cerrada por una pared de troquel que define dicha forma y dimensiones laterales, colocándose el extremo cerrado de la preforma (18, 38) en relación opuesta a un extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411) y estando al menos una porción de la preforma (18, 38) inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel, y
- (b) bajo el control de un ordenador (320) someter la preforma (18, 38) a presión de fluido interna neta para expandir la preforma (18, 38) hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello dicha forma y dimensiones laterales definidas a la preforma (18, 38), ejerciendo dicha presión de fluido una fuerza, en dicho extremo cerrado, hacia dicho extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411),
- (c) suministrar, a dicho ordenador (320), una historia de presión-tiempo optimizada para dicho proceso determinado por el método de la reivindicación 5, y
- (d) realizar el paso (b) sometiendo la preforma (18, 38) a n conjuntos sucesivos de condiciones de presión-tiempo respectivamente correspondientes a n conjuntos sucesivos de condiciones límite de presión-tiempo ($\{P_{b1}, t_{b1}\}, \dots, \{P_{bn}, t_{bn}\}$) que constituyen dicha historia de presión-tiempo optimizada determinada por el método de la reivindicación 5.
9. Un proceso para formar un artículo hueco de metal de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo
- (a) disponer una preforma hueca de metal (18, 38) que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel (11, 44, 211, 411) lateralmente cerrada por una pared de troquel que define dicha forma y dimensiones laterales, con un punzón (12, 46, 54, 212, 412) situado en un extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411) y trasladable a la cavidad (11, 44, 211, 411), colocándose el extremo cerrado de la preforma en relación opuesta próxima al punzón (12, 46, 54, 212, 412) y estando al menos una porción de la preforma (18, 38) inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel;
- (b) bajo control de un ordenador (320), someter la preforma (18, 38) a presión de fluido interna neta para expandir la preforma (18, 38) hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello dicha forma y dimensiones laterales definidas a la preforma (18, 38), ejerciendo dicha presión de fluido una fuerza, en dicho extremo cerrado, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411); y
- (c) trasladar el punzón (12, 46, 54, 212, 412) a la cavidad (11, 44, 211, 411) para enganchar y desplazar el extremo cerrado de la preforma (18, 38) en una dirección opuesta a la dirección de la fuerza ejercida en ella por la presión de fluido, deformando el extremo cerrado de la preforma (18, 38);
- (d) suministrar, a dicho ordenador (320), condiciones límite de presión-tiempo determinadas para dicho proceso por el método de la reivindicación 1, y
- (e) realizar el paso (b) sometiendo la preforma (18, 38) a condiciones de presión-tiempo correspondientes a las condiciones límite de presión-tiempo determinadas por el método de la reivindicación 1.
10. Un proceso según la reivindicación 9, incluyendo además los pasos de detectar el contacto de la preforma con una posición preseleccionada en la pared del troquel y suministrar información representativa del contacto detectado al ordenador (320), y donde el control por ordenador del proceso es sensible a la información de contacto suministrada.
11. Un proceso según la reivindicación 9, incluyendo además los pasos de detectar condiciones de temperatura a las que la preforma se somete durante la realización del proceso y suministrar información representativa de las condiciones de temperatura detectadas al ordenador (320), y donde el control por ordenador del proceso es sensible a la información de temperatura suministrada.
12. Un proceso según la reivindicación 9, donde dicho artículo hueco de metal es un recipiente de metal.
13. Un proceso para formar un artículo hueco de metal de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo
- (a) disponer una preforma hueca de metal que tiene un extremo cerrado en una cavidad de troquel lateralmente

cerrada por una pared de troquel que define dicha forma y dimensiones laterales, con un punzón (12, 46, 54, 212, 412) situado en un extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411) y trasladable a la cavidad (11, 44, 211, 411), colocándose el extremo cerrado de la preforma en relación opuesta próxima al punzón y estando al menos una porción de la preforma inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel,

5 (b) bajo control de un ordenador, someter la preforma a presión de fluido interna neta para expandir la preforma hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello dicha forma y dimensiones laterales definidas a la preforma, ejerciendo dicha presión de fluido una fuerza, en dicho extremo cerrado, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad, y

10 (c) trasladar el punzón (12, 46, 54, 212, 412) a la cavidad (11, 44, 211, 411) para enganchar y desplazar el extremo cerrado de la preforma (18, 38) en una dirección opuesta a la dirección de fuerza ejercida por la presión de fluido en ella, deformando el extremo cerrado de la preforma (18, 38); **caracterizado** por:

15 (d) determinar, para dicha preforma (18, 38), un criterio de fallo que limita las condiciones de presión-tiempo a las que la pieza puede ser sometida sin fallo;

(e) realizando iterativamente análisis de elementos finitos en la preforma (18, 38), desarrollar una historia de presión-tiempo para la preforma (18, 38) incluyendo un valor inicial de presión de fluido interna neta, un intervalo de tiempo inicial durante el que dicho valor inicial se ha de aplicar a la preforma (18, 38), una pluralidad de intervalos de tiempo secuenciales siguientes a dicho intervalo inicial, y una pluralidad correspondiente de valores de presión de fluido interna neta sucesivamente inferiores a aplicar respectivamente a la preforma (18, 38) durante dicha pluralidad de intervalos de tiempo secuenciales, donde los valores de presión de fluido interna y las duraciones de los intervalos de tiempo son tales que el criterio de fallo nunca se supere durante dicha historia de presión-tiempo completa;

(f) suministrar, a dicho ordenador (320), dicha historia de presión-tiempo; y

(g) realizar el paso (b) sometiendo la preforma (18, 38) a dicha historia de presión-tiempo.

30 14. Un proceso según la reivindicación 13, donde dicho criterio de fallo es un valor limitativo de la tasa de deformación.

35 15. Un proceso para formar un artículo hueco de metal de forma y dimensiones laterales definidas, incluyendo

(a) disponer una preforma hueca de metal (18, 38) que tiene extremos opuestos, de los que uno está cerrado, en una cavidad de troquel (11, 44, 211, 411) lateralmente cerrada por una pared de troquel que define dicha forma y dimensiones laterales, teniendo la cavidad (11, 44, 211, 411) un eje y un extremo interior cerrado al que mira el extremo cerrado de la preforma, estando al menos una porción de la preforma (18, 38) inicialmente espaciada hacia dentro de la pared del troquel, y un pistón (14, 48, 214, 216, 414, 416) trasladable axialmente con respecto a la cavidad (11, 44, 211, 411) hacia el extremo interior cerrado y dispuesto para ejercer fuerza en el otro extremo de la preforma (18, 38) en una dirección hacia el extremo interior cerrado de la cavidad (11, 44, 211, 411);

45 (b) someter la preforma (18, 38) a presión de fluido interna neta bajo el control de un ordenador para expandir la preforma (18, 38) hacia fuera a contacto sustancialmente completo con la pared del troquel, para impartir por ello dicha forma y dimensiones laterales definidas a la preforma (18, 38), ejerciendo dicha presión de fluido una fuerza, en dicho extremo cerrado, dirigida hacia dicho extremo de la cavidad (11, 44, 211, 411);

50 (c) trasladar el pistón (14, 48, 214, 216, 414, 416) para desplazar dicho otro extremo de la preforma (18, 38) hacia el extremo cerrado de la cavidad de troquel (11, 44, 211, 411);

(d) suministrar, a dicho ordenador (320), condiciones límite de presión-tiempo determinadas para dicho proceso por el método de la reivindicación 1, y

55 (e) realizar el paso (b) sometiendo la preforma (18, 38) a condiciones de presión-tiempo correspondientes a las condiciones límite de presión-tiempo determinadas por el método de la reivindicación 1.

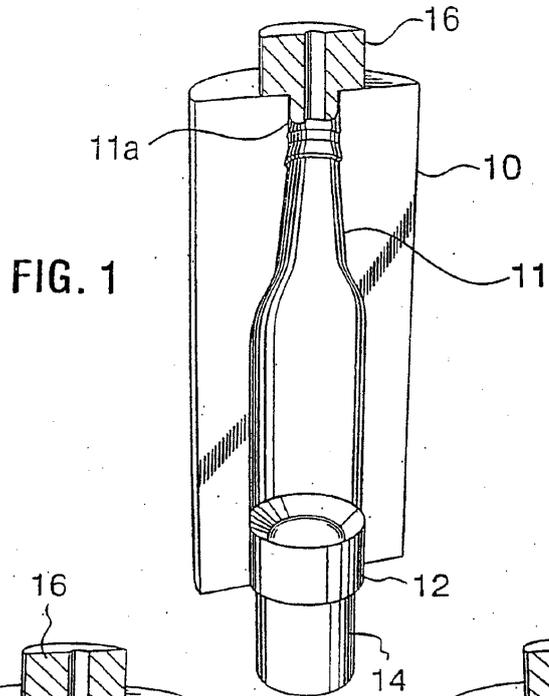


FIG. 1

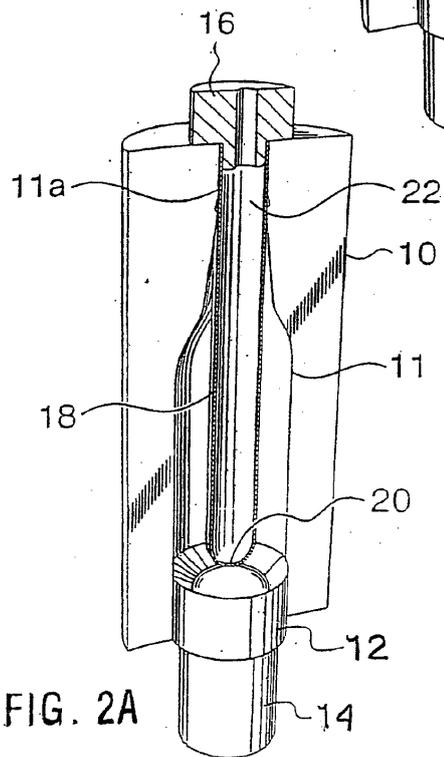


FIG. 2A

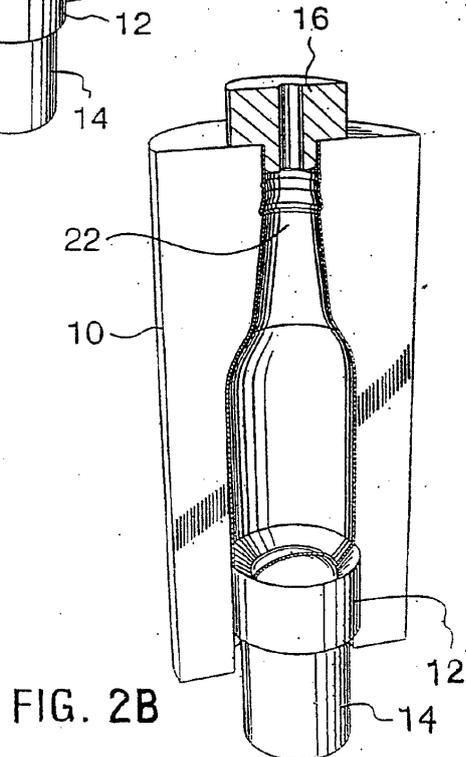


FIG. 2B

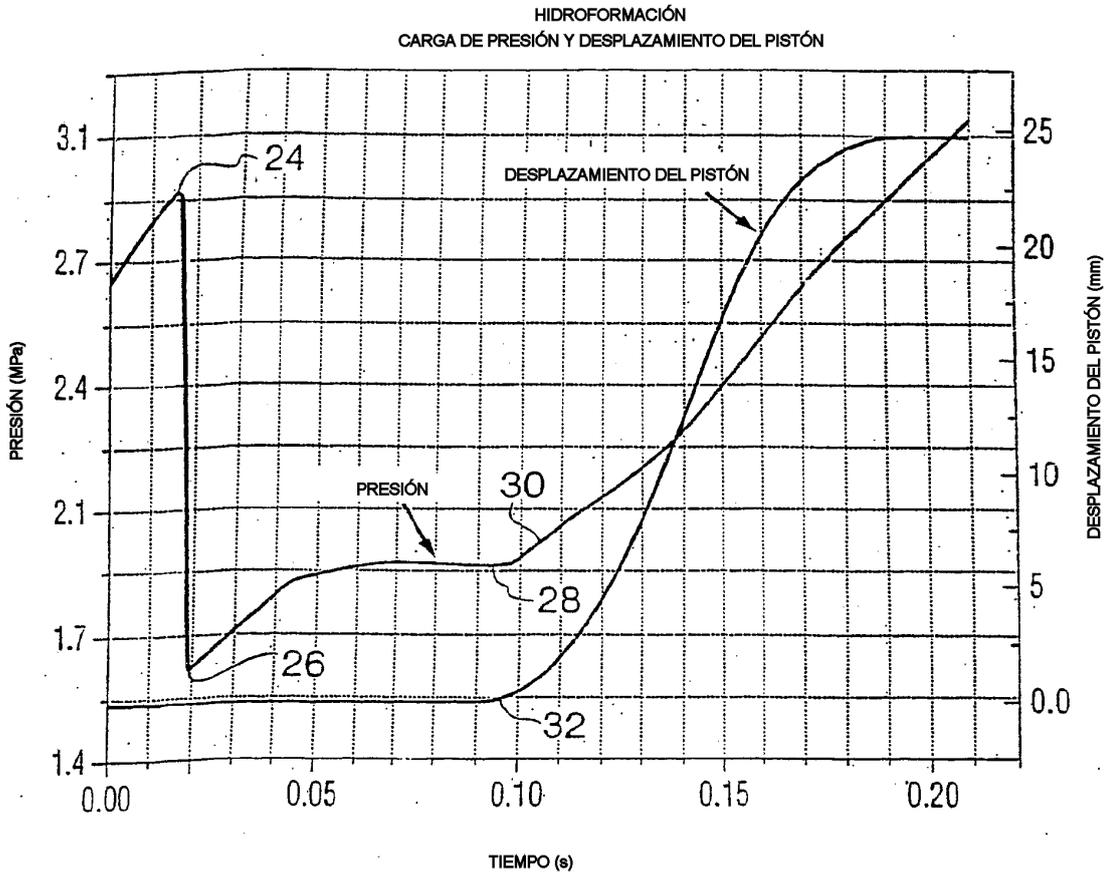
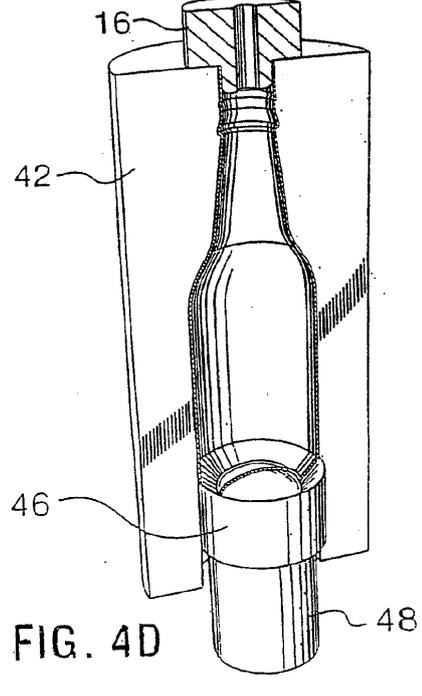
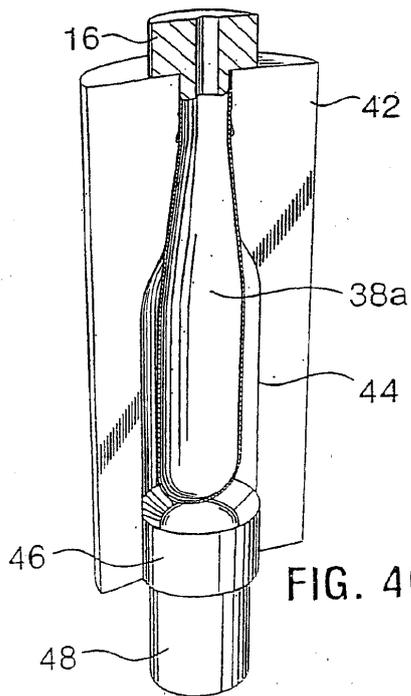
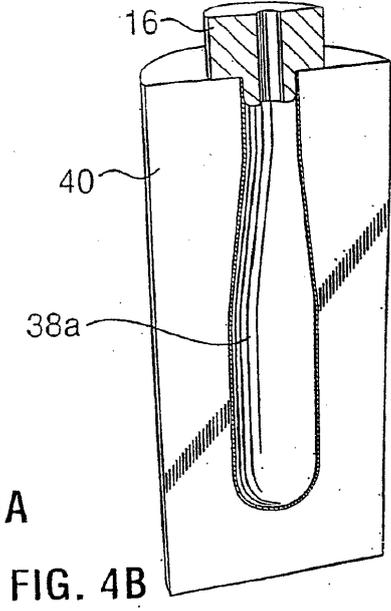
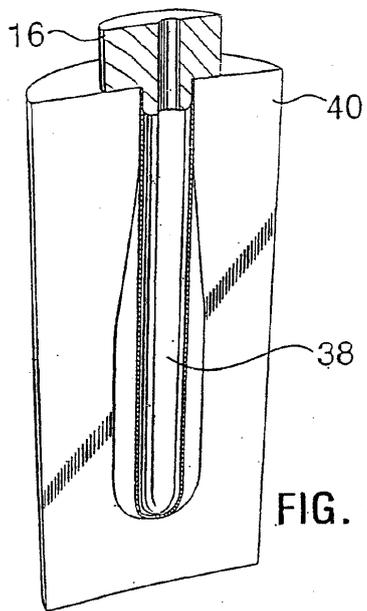


FIG. 3



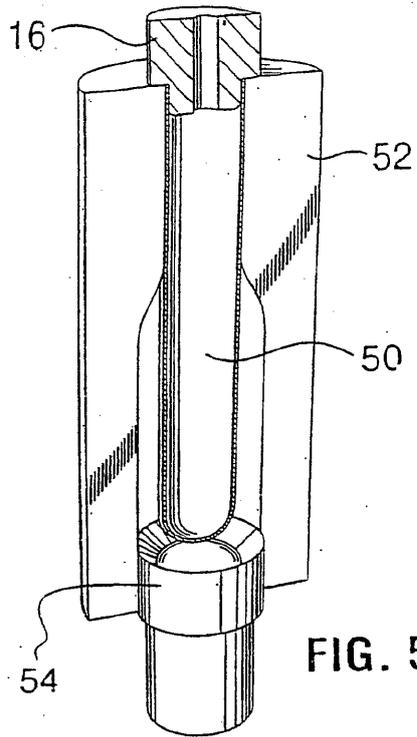


FIG. 5a

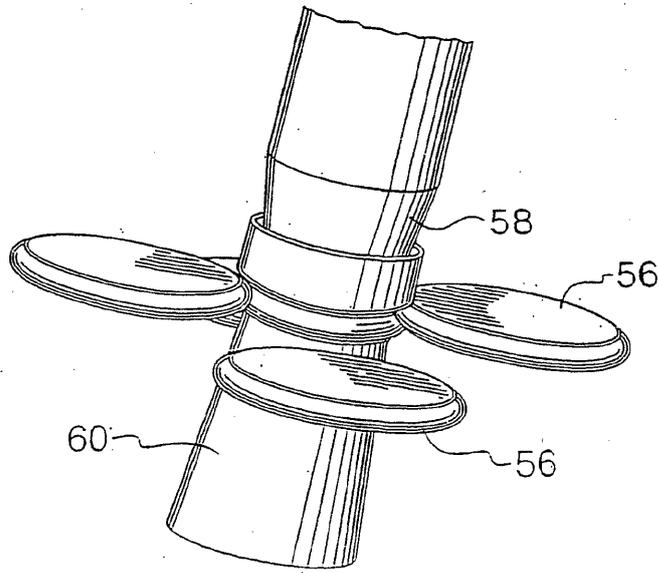


FIG. 5B

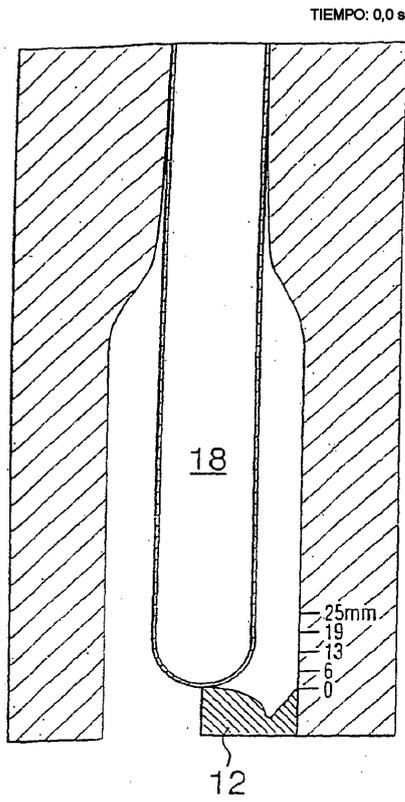


FIG. 6A

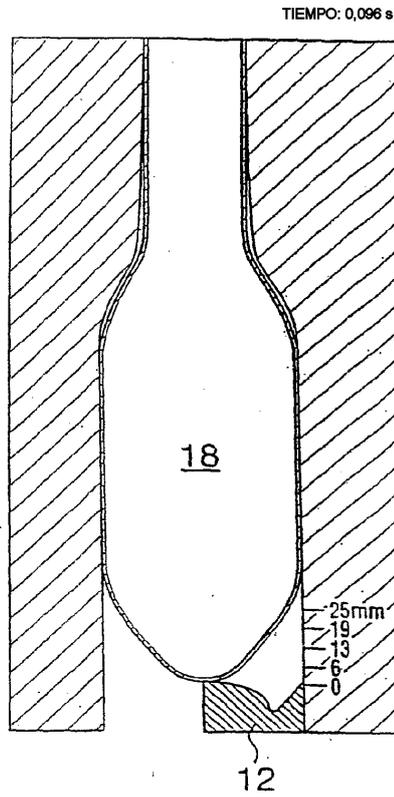


FIG. 6B

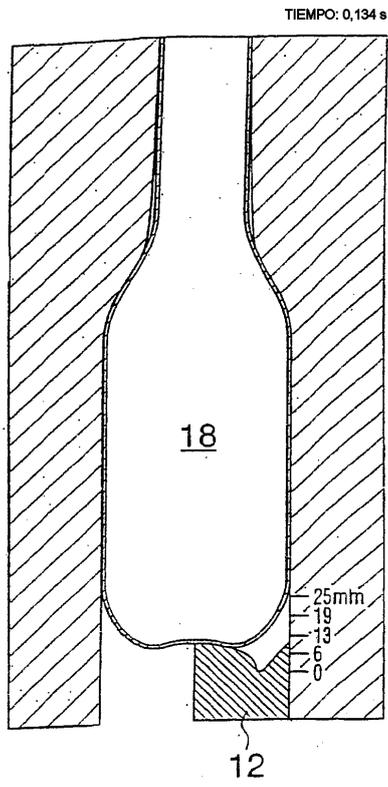


FIG. 6C

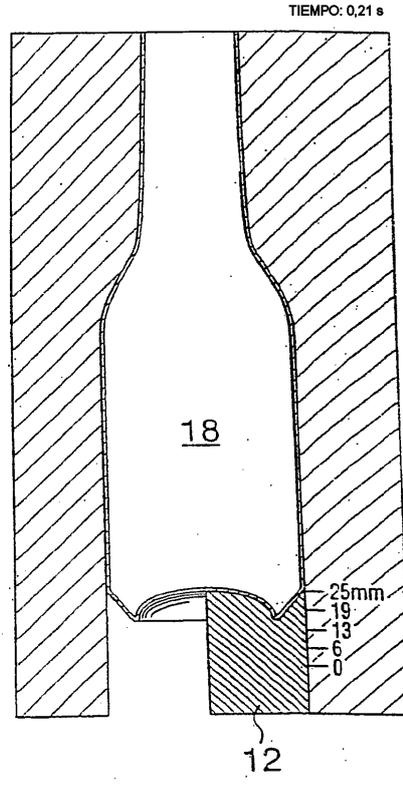
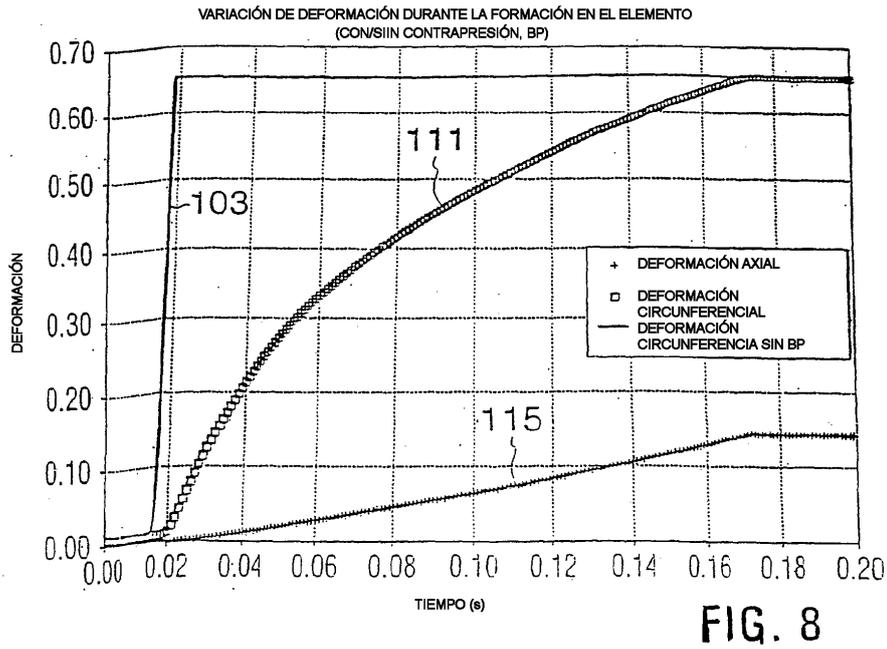
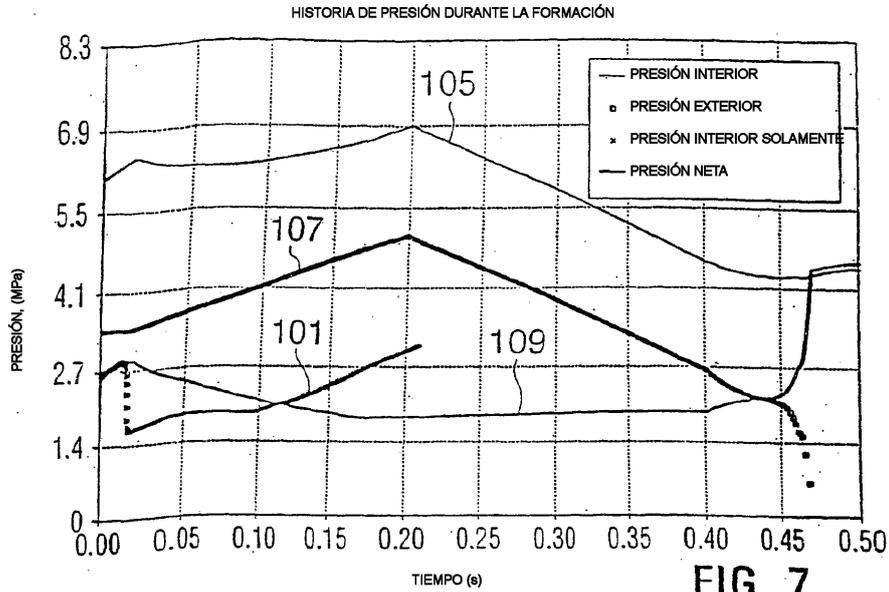
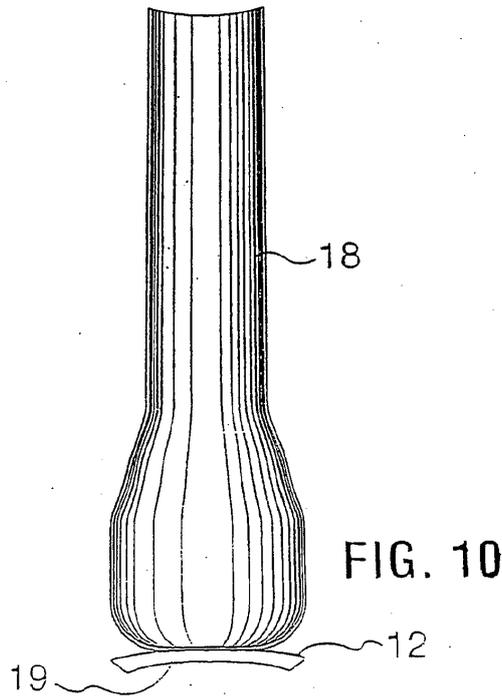
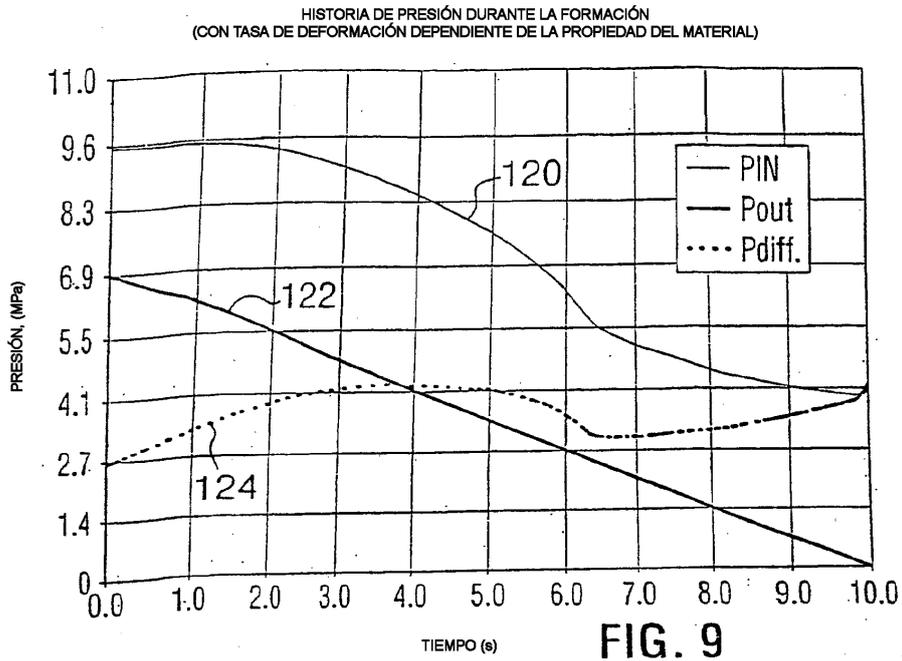


FIG. 6D





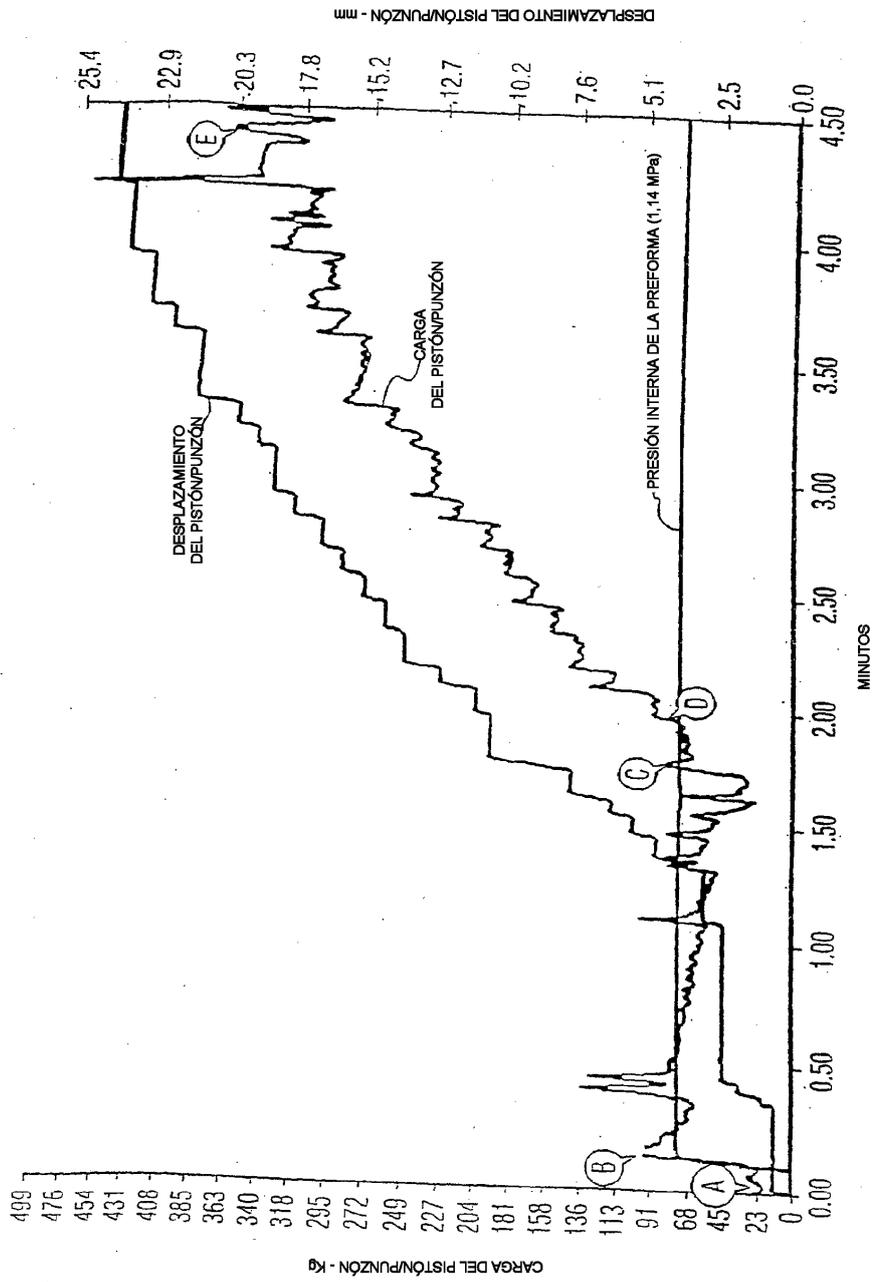


FIG. 11

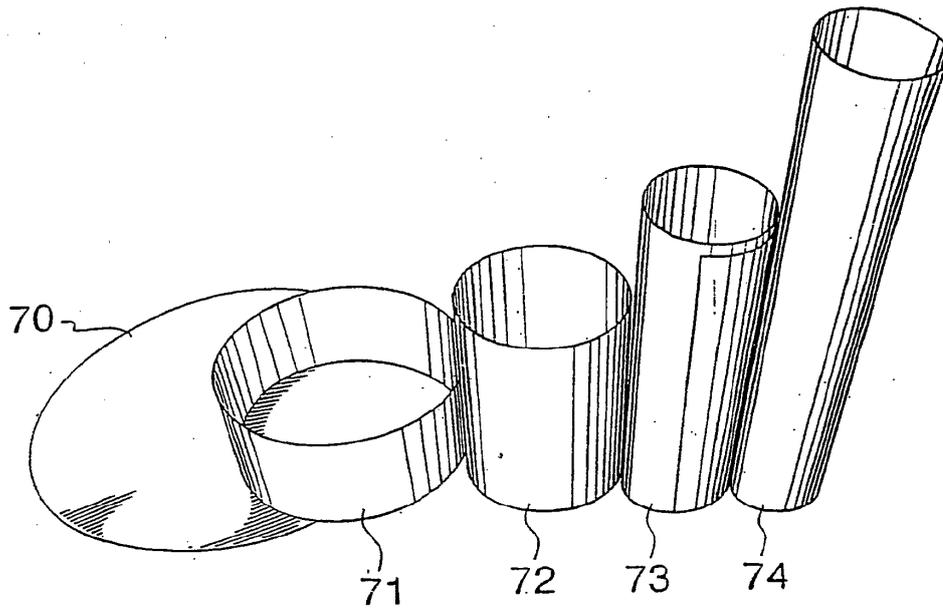


FIG. 12

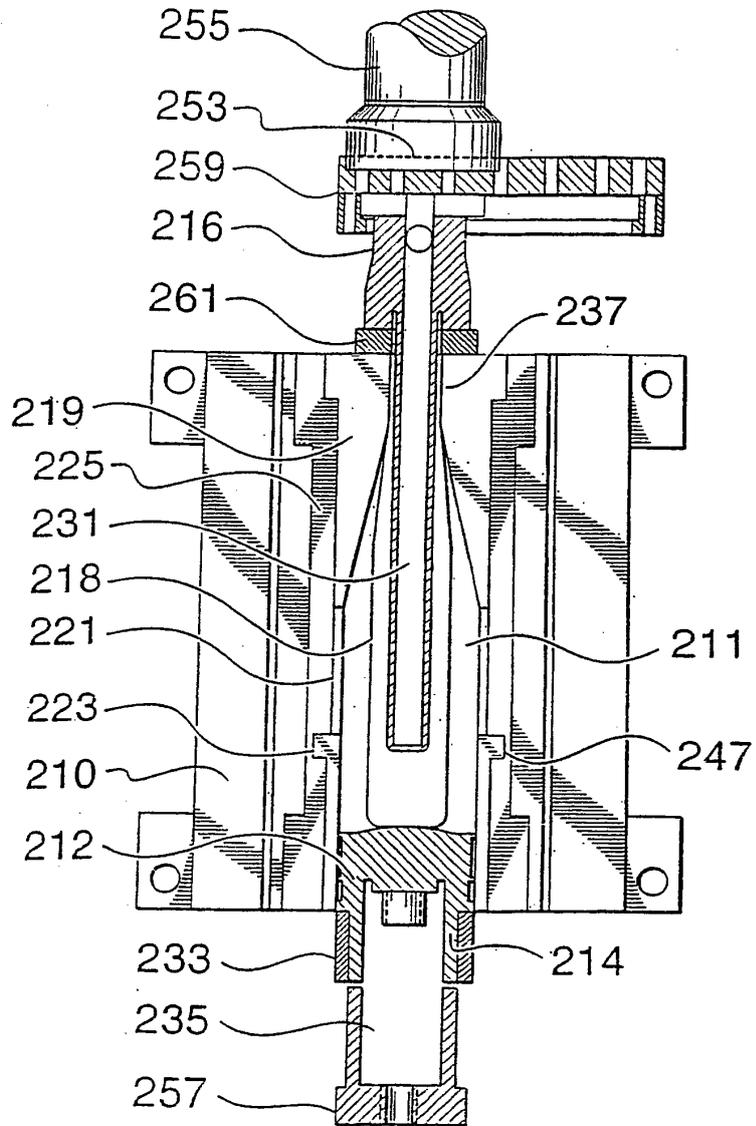


FIG. 13

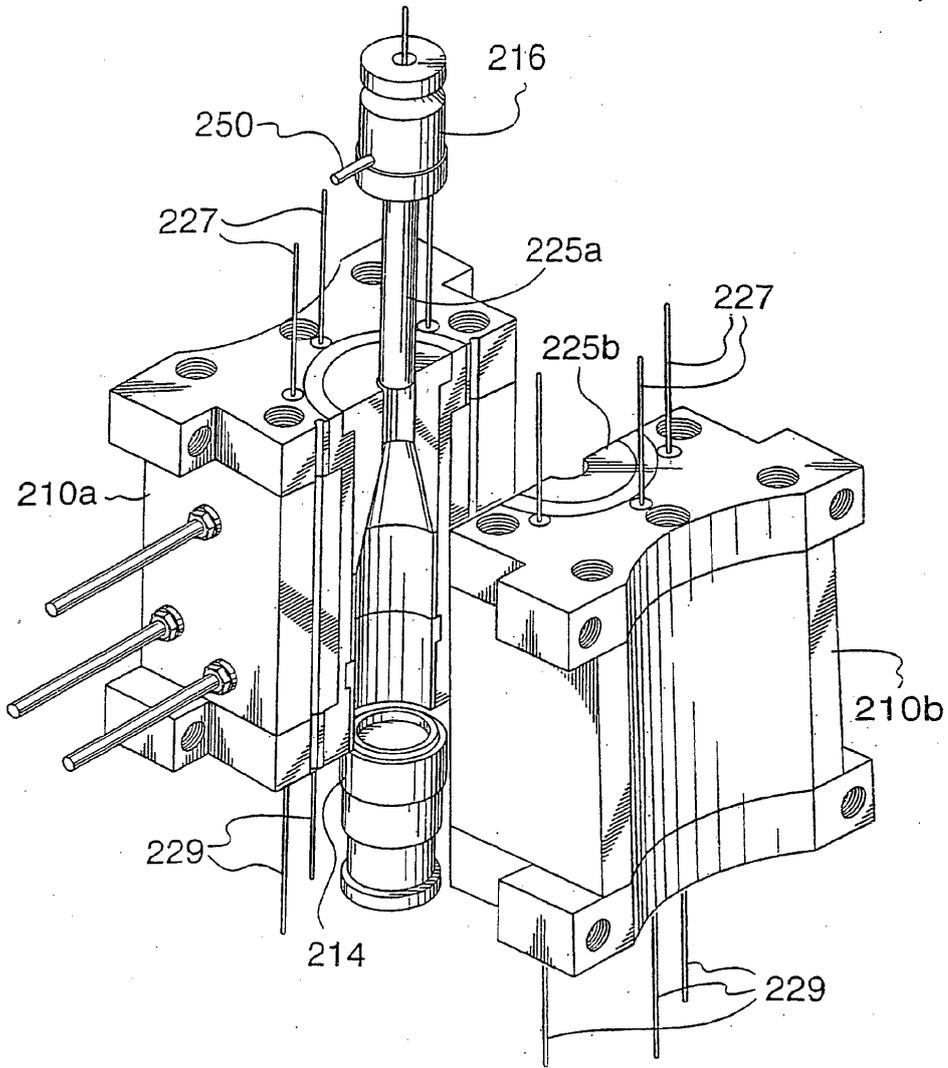
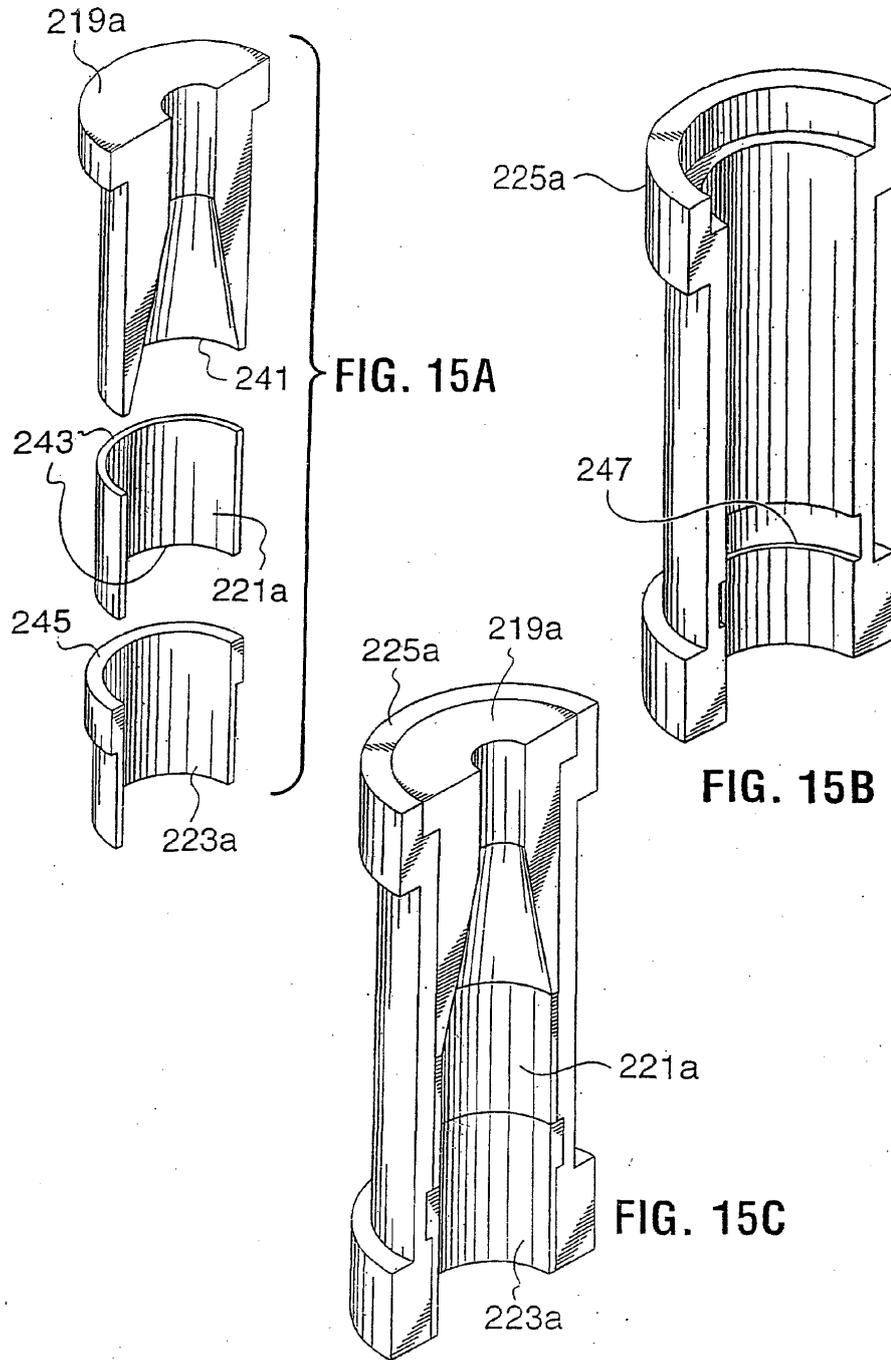


FIG. 14



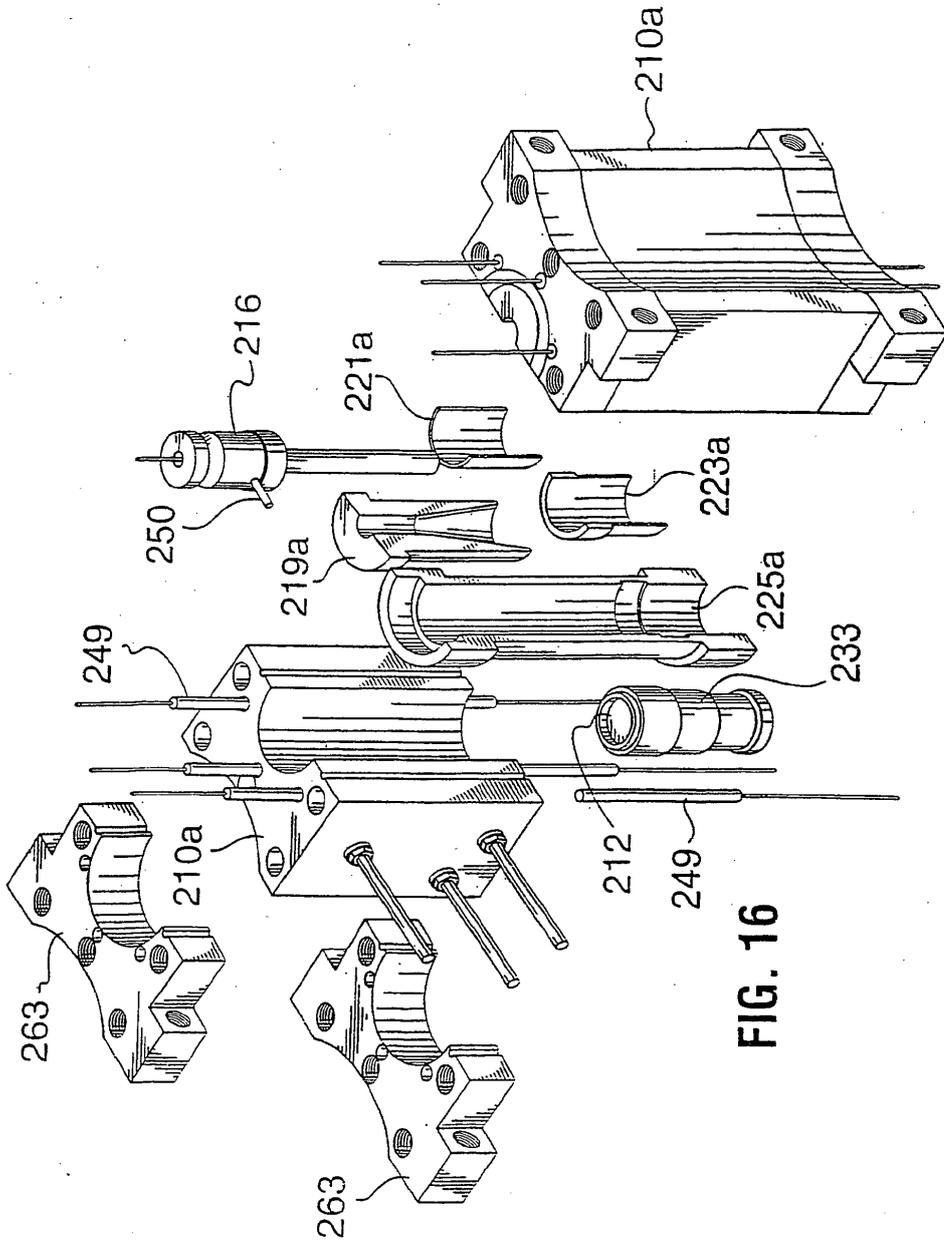


FIG. 16

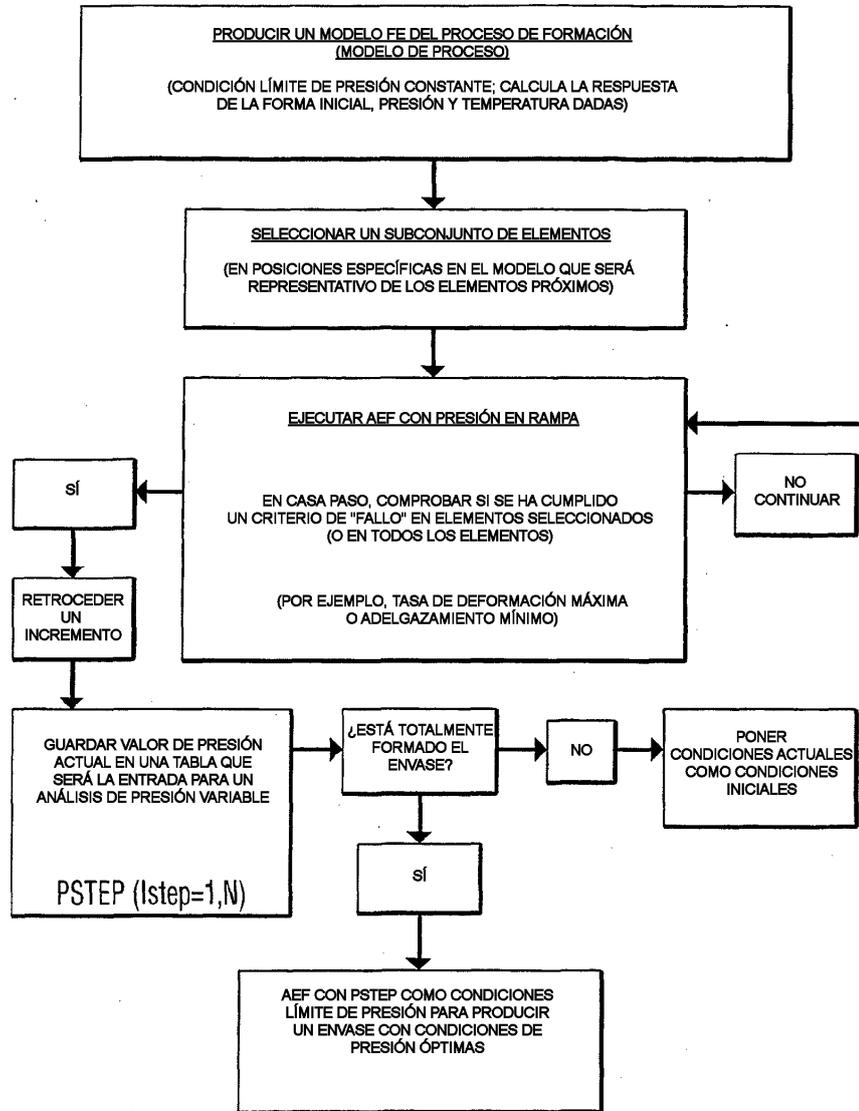


FIG. 17

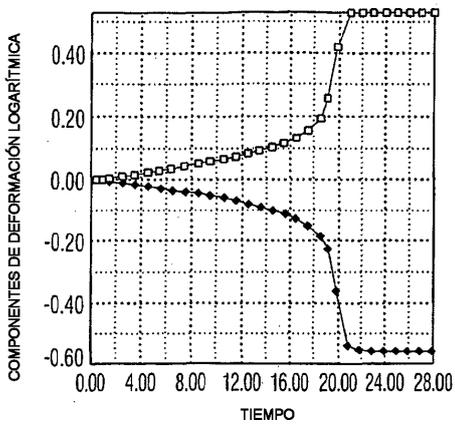


FIG. 18A

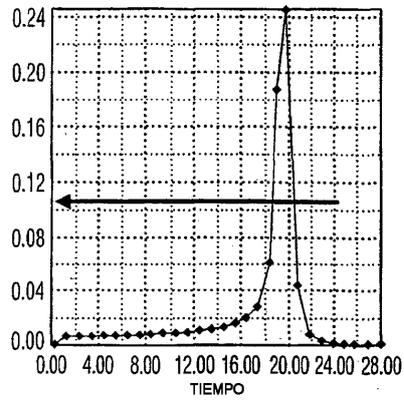


FIG. 18B

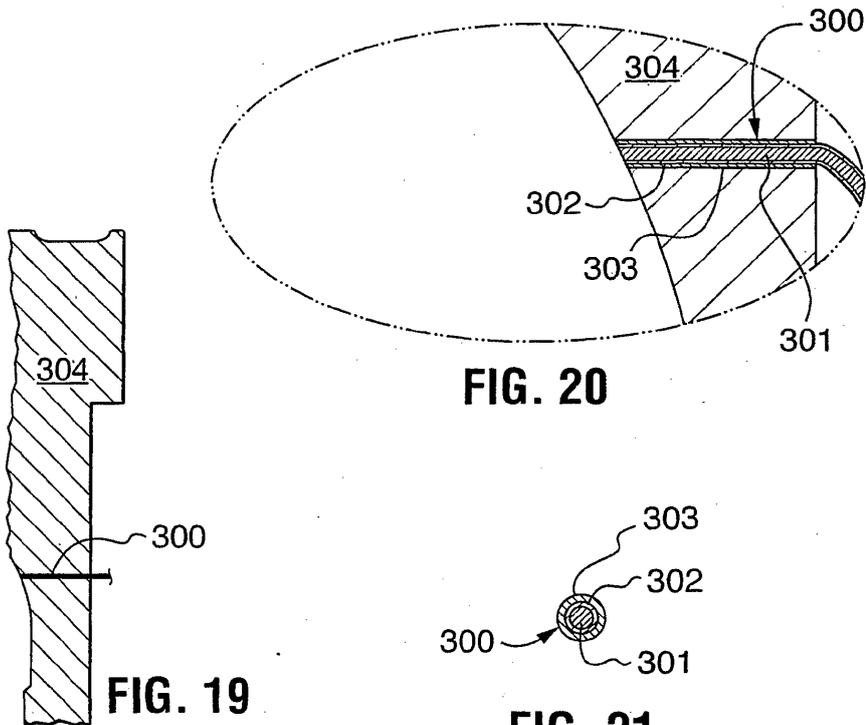


FIG. 19

FIG. 20

FIG. 21

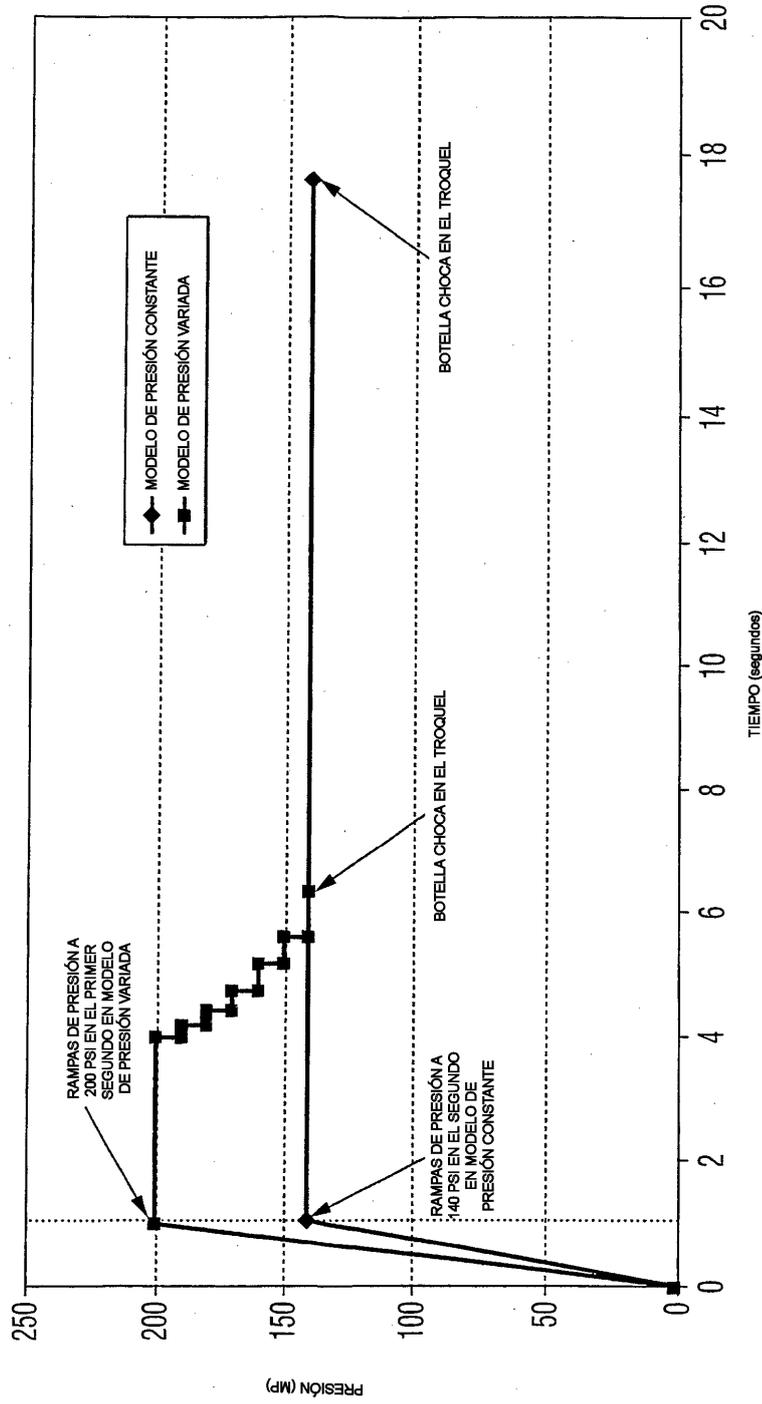


FIG. 22

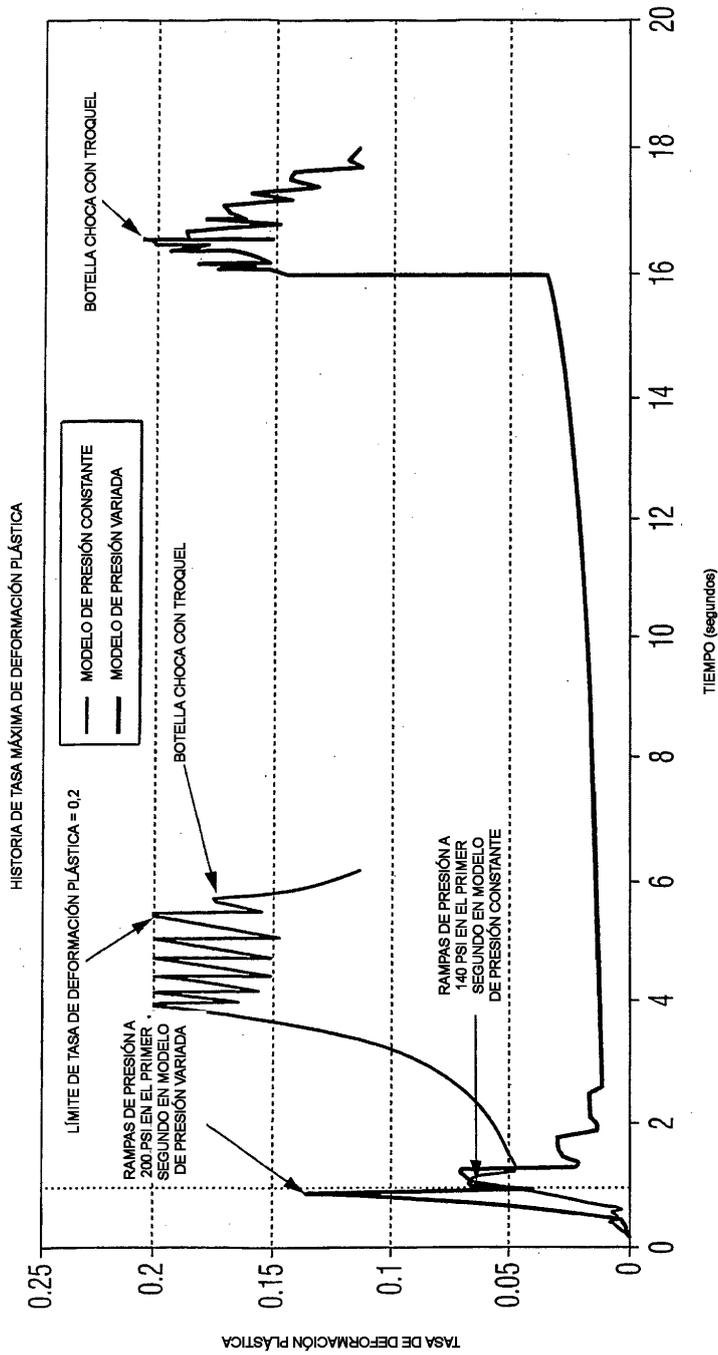


FIG. 23

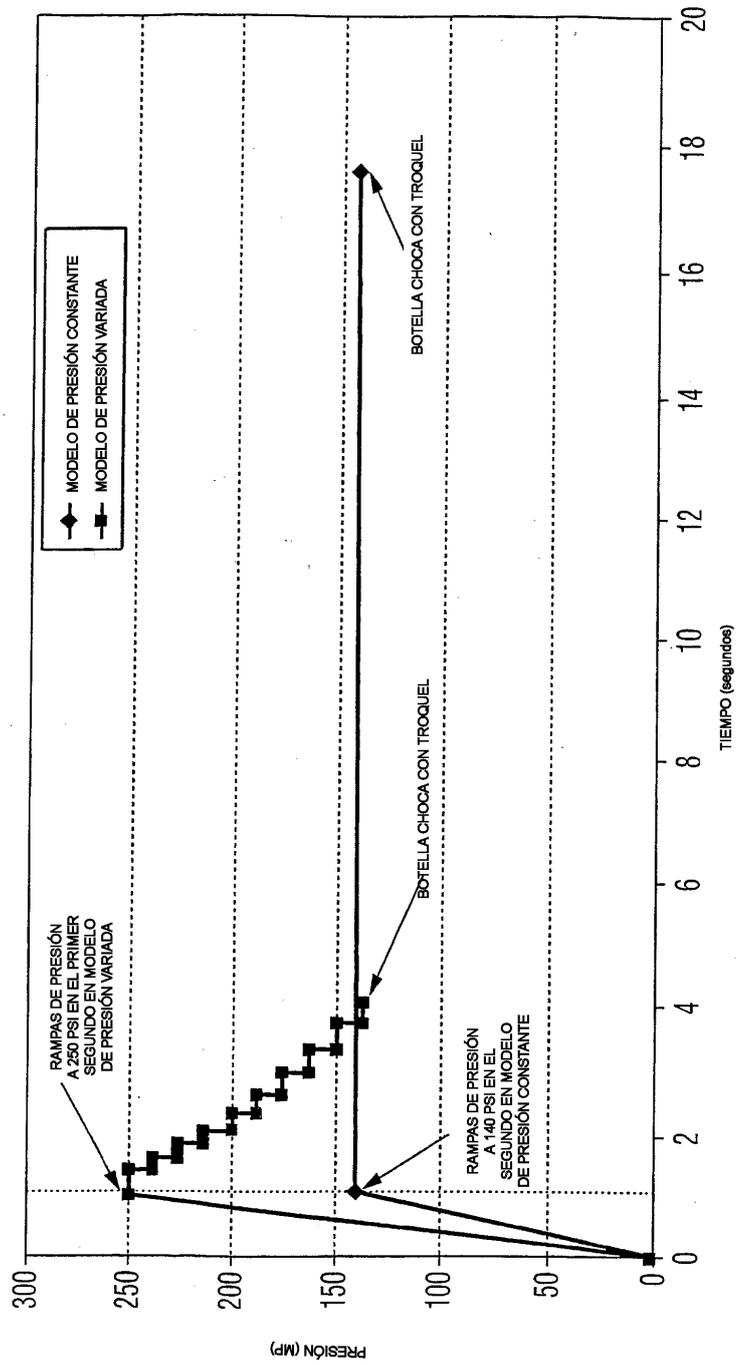


FIG. 24

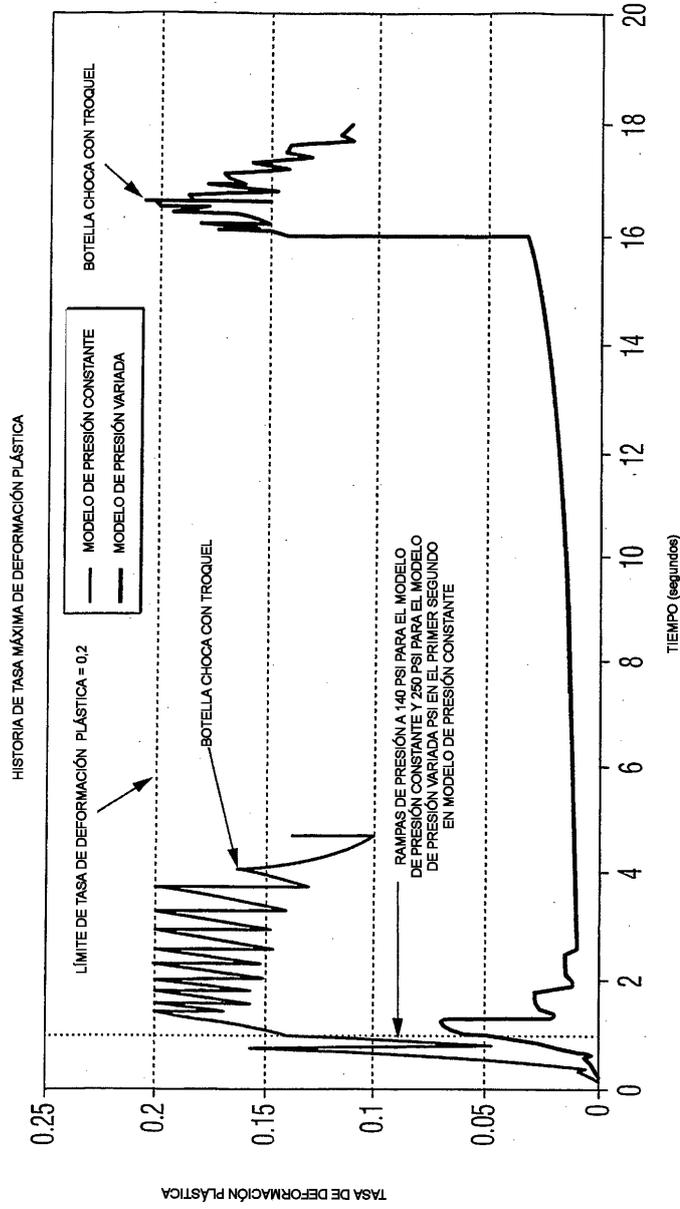


FIG. 25

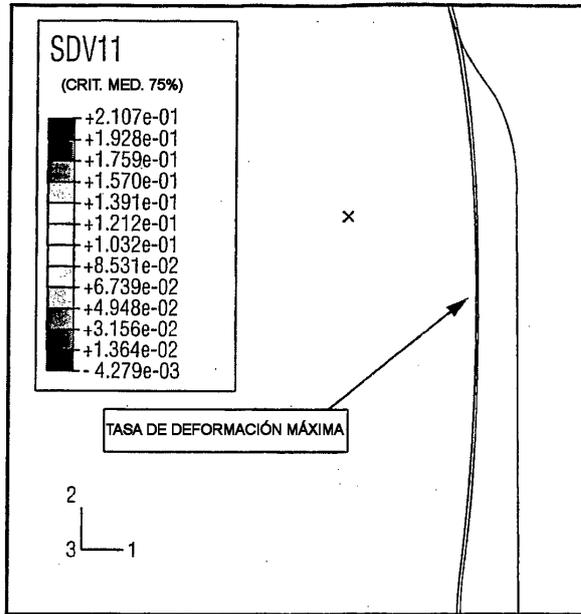


FIG. 26A

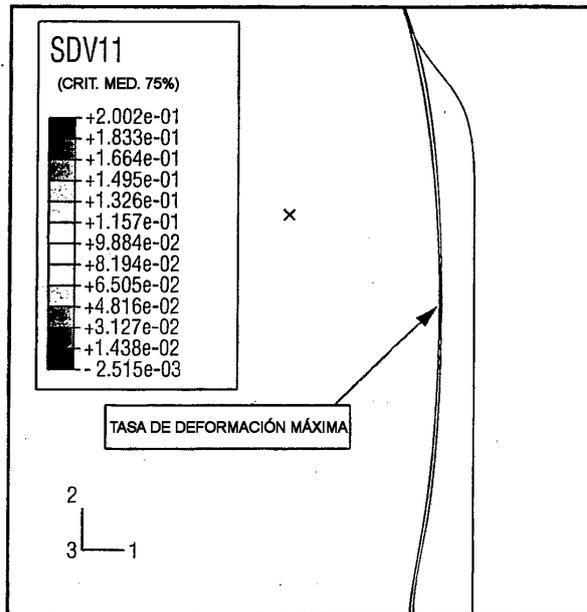


FIG. 26B

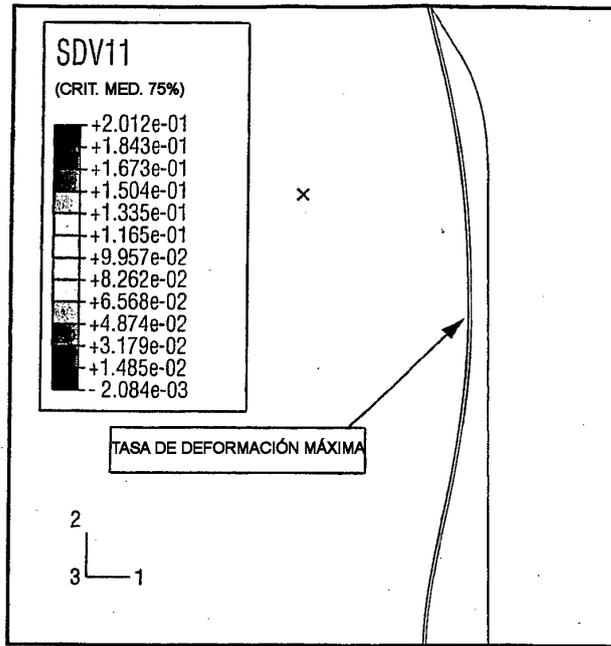


FIG. 26C

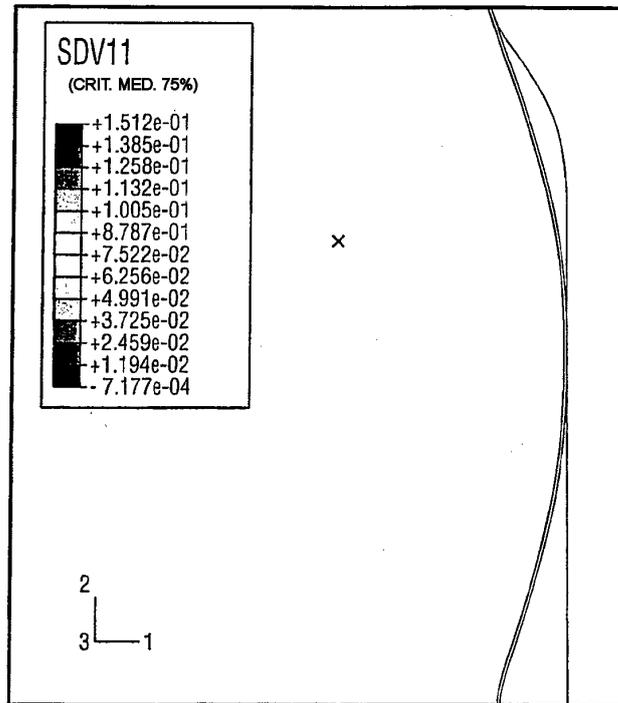


FIG. 26D

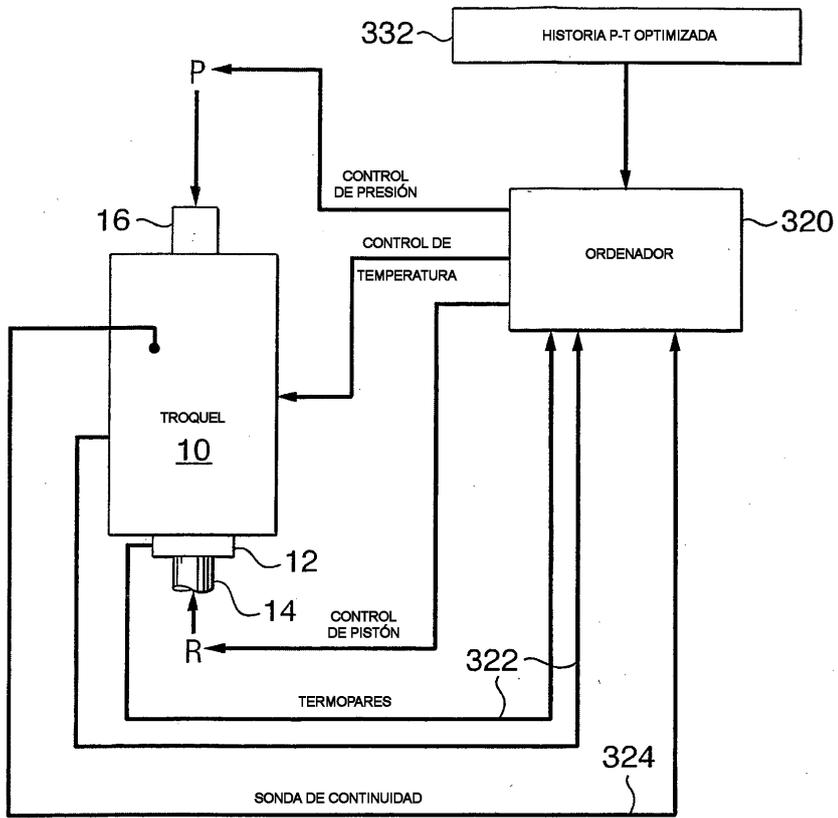


FIG. 27

