

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 669 985**

51 Int. Cl.:

**F17C 1/00**

(2006.01)

12

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.01.2015 PCT/IB2015/050668**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.08.2015 WO15114549**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.01.2015 E 15705718 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.03.2018 EP 3099970**

54 Título: **Método mejorado para producir recipientes de material compuesto de alta resistencia con revestimiento de metal interior y recipientes producidos mediante dicho método**

30 Prioridad:

**31.01.2014 IT PN20140007**

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

**29.05.2018**

73 Titular/es:

**C.N.G.V. D.O.O (100.0%)  
Veliki trg 17  
6310 Izola, SI**

72 Inventor/es:

**FRATTI, GIOVANNI**

74 Agente/Representante:

**ZUAZO ARALUZE, Alexander**

ES 2 669 985 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).

**MÉTODO MEJORADO PARA PRODUCIR RECIPIENTES DE MATERIAL COMPUESTO DE ALTA RESISTENCIA  
CON REVESTIMIENTO DE METAL INTERIOR Y RECIPIENTES PRODUCIDOS MEDIANTE DICHO MÉTODO**

**DESCRIPCIÓN**

**Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método para la fabricación de recipientes de metal, denominados a continuación en el presente documento tanques, especialmente diseñados y contruidos para contener un fluido, y en particular un gas, almacenado a una presión muy alta.

Más específicamente, la invención se refiere a la fabricación de tanques para el almacenamiento y transporte de gas a presión, incluyendo gases inflamables tales como metano, etano o cualquier otra mezcla gaseosa de origen fósil, incluyendo subproductos del petróleo.

Se conoce bien que la producción de gases de combustibles fósiles depende totalmente de la viabilidad del transporte de estos gases desde el centro de producción hasta los puntos de distribución y consumo, que con bastante frecuencia están ubicados lejos de los yacimientos.

Cuando el transporte de gas por medio de tuberías tradicionales es problemático o imposible debido a una variedad de motivos, tales como restricciones geopolíticas, medioambientales, técnicas, y más especialmente económicas, resultan evidentes la conveniencia y las ventajas que ofrece el transporte marítimo, por medio de barcos equipados adecuadamente.

Se han usado barcos ampliamente y desde hace mucho tiempo para transportar gas; sin embargo, este método de transporte se encuentra con graves limitaciones que resultan del hecho de que el transporte de gas todavía en su estado gaseoso, aunque es viable técnicamente, no es ventajoso desde un punto de vista económico, en la medida en que requeriría la construcción de barcos equipados con tanques específicos diseñados para llenarse con el gas comprimido a una presión muy alta.

En efecto, la fabricación de tales tanques, diseñados para funcionar en condiciones de presión muy alta, se topa con restricciones técnicas/económicas que se derivan del hecho de que tendría que diseñarse y fabricarse un tanque de esta naturaleza principalmente para resistir la presión interna, un factor que requeriría que la pared del tanque fuese altamente resistente, por tanto bastante gruesa, si se fabrica según técnicas tradicionales.

Queda claro que este requisito técnico está en conflicto con tres limitaciones técnicas/económicas:

- en primer lugar, aumentar el grosor de la pared del tanque es costoso y obviamente menoscabaría las ventajas económicas del método de transporte;
- en segundo lugar, al permanecer inalterados los volúmenes externos, un mayor grosor de la pared del tanque provoca una reducción del volumen interno disponible (carga útil), que reduce adicionalmente el beneficio que resulta del coste global del tanque frente al volumen de los bienes transportados;
- en tercer lugar, aumentar el grosor de la pared del tanque da como resultado automáticamente un mayor peso del tanque. Si los tanques se transportan por barco, como en este caso, resulta inmediatamente evidente que, como sabe todo experto de la industria, el aumento de peso resultante requiere la fabricación y el uso de barcos más grandes (mayor desplazamiento), lo que conduce a su vez a una reducción todavía mayor de la ventaja económica de transportar gas comprimido almacenado en tanques fabricados según el método tradicional.

Un método bien conocido, concebido para superar estas restricciones ha sido el de licuar el gas y transportarlo como un líquido normal, almacenado en tanques adecuados a presión casi atmosférica. En estas condiciones, se superan básicamente las restricciones técnicas/económicas mencionadas anteriormente, relacionadas con el transporte por barco de gas a alta presión, con los onerosos requisitos específicos comentados anteriormente.

Sin embargo, este método se enfrenta a otras restricciones técnicas/económicas diferentes, que consisten principalmente en el hecho de que debe proporcionarse una planta de licuefacción de gas aguas arriba del punto de carga del recipiente, al tiempo que deben ponerse a disposición instalaciones de regasificación correspondientes en el punto de desembarque de la carga.

Estos inconvenientes fundamentales significan que el coste global de transporte aumenta significativamente debido a los costes de capital y de funcionamiento de las plantas, incluyendo el coste de la energía requerida para la licuefacción de gas.

Como se conocen bien todas las consideraciones expuestas de forma sucinta anteriormente por los expertos de la

industria, no se comentarán adicionalmente en el presente documento.

Para superar los límites mencionados anteriormente, se han desarrollado diversas técnicas para el diseño y la fabricación de tanques adecuados para el transporte de gas a alta presión, normalmente de más de 100 bar.

El método descrito en la patente US 6.425.172, se conoce bien. Se refiere a la fabricación de un tanque partiendo de un revestimiento de metal (denominado a continuación en el presente documento "revestimiento"), que se envuelve luego con una o más capas de materiales compuestos estructurales impregnados con resina y reforzados con fibra, seguido por la igualación de las tensiones del esfuerzo de tracción entre las diversas fibras del material compuesto impregnado por medio de un método de calentamiento y un método de enfriamiento lento posterior.

Este método puede combinarse con un tratamiento de autozunchado conocido cuyos fines también se conocen bien.

Este método, al que se someten normalmente tanques de acero cilíndricos diseñados para resistir altas presiones, consiste en someter el tanque a una presión interna mediante la cual el material se estira más allá de su límite elástico, de modo que el tanque experimenta una deformación permanente limitada. Esto da como resultado endurecimiento y alargamiento permanentes del material, que es mayor en las capas interiores. Estas, después de liberarse la presión, ejercerán una deformación sobre las capas exteriores. Este tensado de las capas exteriores, que está todavía dentro de su límite elástico, producirá alrededor de las capas interiores un estado de esfuerzo previo incluso a presión cero. Cuando las capas interiores se someten a continuación a presión, estando ya sometidas a esfuerzo previo y sujetas a la misma carga de funcionamiento, estarán en un estado de menor tensión. En resumen, para reducir el grosor del revestimiento y su peso al tiempo que se conservan o aumentan los factores de seguridad, se emplea esta técnica de autozunchado para someter a esfuerzo previo una parte de, o todo el grosor de, el revestimiento para ampliar el campo de deformación elástica sin reducir la resistencia a la fatiga sino posiblemente, en algunos casos, potenciarla.

La técnica de autozunchado, tal como se aplica a recipientes o tanques a presión que se componen de materiales compuestos, consiste en ejercer suficiente presión para alcanzar y superar el límite de elasticidad del metal y la presión de ensayo del tanque, que es habitualmente 1,5 veces la presión de funcionamiento, de modo que la deformación es permanente y estable a lo largo de la vida de funcionamiento del tanque, incluso después de los reensayos necesarios requeridos por la legislación vigente. Esta deformación plástica implica sólo la pared de metal, en ambas direcciones axial y circunferencial, mientras que la capa exterior, que se compone de material compuesto, permanece dentro de su campo elástico. Esta característica es típica de las fibras de carbono, vidrio y aramida.

Tal como se mencionó anteriormente, el método de autozunchado se lleva a cabo en el tanque terminado, es decir después de haberse envuelto con el material compuesto. Se lleva a cabo normalmente introduciendo un líquido en el tanque, particularmente un líquido a alta presión, para deformar permanentemente el revestimiento interior. Esta deformación puede superar el 0,95-1,8%. Considerando que el alargamiento a la rotura de estas fibras oscila entre el 1,9 y el 3,6%, y considerando además el factor de seguridad en relación con la presión de funcionamiento, que oscila entre 2,35 y 3,6, puede afirmarse que durante el ensayo hidráulico puede superarse el alargamiento máximo:

- el 0,95% para las fibras de carbono y aramida,
- el 1,8% para vidrio.

Esta técnica no produce ninguna mejora significativa ni con respecto a un mayor volumen del tanque ni con respecto a una resistencia circunferencial y axial aumentada de todo el tanque, ya que estos factores dependen de la carga de rotura del revestimiento y del material compuesto, que no se modifican significativamente mediante el método de autozunchado.

En el caso de cilindros con revestimiento de metal reforzado externamente mediante fibras de carbono, vidrio o Kevlar impregnadas con resinas termoendurecibles o resinas incorporadas en materiales termoplásticos, los módulos elásticos del revestimiento y el material compuesto, respectivamente, pueden ser muy diferentes. En este caso, son unos cuantos ejemplos:

- la mayor parte de aleaciones de acero tienen un "módulo de elasticidad de Young" E dentro del intervalo de 190.000-215.000 N/mm<sup>2</sup>;
- la mayor parte de aleaciones de aluminio tienen un módulo E que oscila entre 64.000 y 80.000 N/mm<sup>2</sup>;
- la mayor parte de materiales compuestos con fibra de carbono y resina epoxídica usados ampliamente tienen un módulo E que oscila entre 138.000 y 175.000 N/mm<sup>2</sup>
- los materiales compuestos con fibra de vidrio y resina epoxídica tienen un módulo E que oscila entre 44.000 y 60.000 N/mm<sup>2</sup>.

Desde un punto de vista industrial, se eligen generalmente los materiales compuestos más económicos, lo que significa materiales compuestos con fibra de vidrio. Sin embargo, resulta obvio que si se eligiese la combinación revestimiento de acero/material compuesto con fibra de vidrio (la combinación más económica) se tendría un módulo elástico muy diferente. Esto significa que, durante la primera etapa del método de carga (cuando el tanque se carga por primera vez hasta la presión establecida), la mayor parte del esfuerzo específico,  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  (ley de Hooke), se absorberá por el revestimiento, que tiene un módulo de elasticidad E más de 3 veces mayor que el del material compuesto al tiempo que, de manera congruente, el estiramiento del revestimiento y el material compuesto en su superficie de contacto es idéntico.

Si se desea adoptar un coeficiente de seguridad admisible mínimo, por ejemplo 3, con relación a la presión de funcionamiento, significa que el recipiente o tanque debe estallar a una presión no menor a 3 veces la presión de funcionamiento.

Si a la presión de estallido, las fibras del material compuesto se rompen, significa que han alcanzado su carga admisible máxima, o, dicho de otro modo, su deformación máxima permitida, y por tanto, todavía con referencia a fibra de vidrio, un alargamiento del 3,6%.

Como el comportamiento de estas fibras, tal como se mencionó anteriormente, es prácticamente lineal hasta el punto de rotura, se deduce que pueden calcularse las deformaciones correspondientes tanto a la presión de funcionamiento =  $3,6/3 = 1,2\%$ , así como a la presión de ensayo, que, según las normas actuales, se establece normalmente a 1,5 veces la presión de funcionamiento =  $1,5 \times 1,2 = 1,8\%$ .

Con estas deformaciones, tanto las aleaciones de acero así como las aleaciones de aluminio están bastante dentro del campo plástico.

Además, para obtener una deformación permanente y estable en los siguientes reensayos hidráulicos periódicos, que se requieren por las normas actuales, es necesario aumentar esta deformación en un porcentaje, incluso uno mínimo.

Esta línea de razonamiento es todavía más válida si se considera la otra relación fundamental referente al equilibrio de fuerzas.

La tensión  $\sigma$  también se define como  $F/A$ , donde F es la carga o fuerza total, y A es la superficie sobre la que se ejerce esta fuerza.

Para reducir costes y pesos al tiempo que se aumentan simultáneamente los volúmenes, manteniendo inalteradas las dimensiones exteriores globales, es necesario reducir el grosor de los materiales, es decir el valor de A, que es una función del grosor. De hecho, si se considera una sección transversal de pared con longitud unitaria, puede decirse que  $A = S \times 1$  y por tanto:

$$\sigma = F/A = F/S \cdot 1 = E \cdot \varepsilon$$

Esto significa que, si F, que está relacionado directamente con la presión de carga, sigue siendo igual, cuanto menor sea S, mayor será  $\sigma$ , y puesto que E es constante, debe aumentar el valor de  $\varepsilon$ , es decir los alargamientos específicos.

Se deduce que, usando los coeficientes de seguridad requeridos por las normas actuales, y grosores de revestimiento mínimos para reducir costes y pesos, el método de autozunchado (denominado a continuación en el presente documento "autozunchado") se vuelve inevitable y como consecuencia de la fabricación y certificación de dichos recipientes y tanques.

Este método también tiene determinadas ventajas si se aplica convenientemente. En efecto, cuando se libera la presión de autozunchado, las paredes del revestimiento se ponen bajo compresión, de modo que cuando se aplica la presión interna una vez más sobre el mismo recipiente, el esfuerzo sobre el revestimiento será menor. Esto significa que la mediana del valor de  $\sigma$  en el material del revestimiento será menor y, tal como han mostrado los experimentos, el comportamiento de fatiga mejorará de manera correspondiente.

Sin embargo, debe prestarse una gran atención a la selección de los materiales que van a usarse, así como a las dimensiones de las paredes, ya que una excesiva plasticidad o baja ductilidad del material puede inducir un excesivo endurecimiento por acritud del propio material, con la consiguiente fragilidad y reducción, incluso reducción drástica, de la longevidad a la fatiga.

Este riesgo se vuelve incluso mayor si el gas, o más generalmente el fluido, que debe introducirse en el recipiente, contiene impurezas que pueden provocar los fenómenos bien conocidos de corrosión por esfuerzo o fragilidad

debido a hidrógeno naciente.

Después del autozunchado, si las deformaciones permanentes son excesivas, entonces también los esfuerzos de compresión inducidos por el material compuesto en las paredes del revestimiento serán muy altos. Puede producirse un fenómeno bien conocido en estas condiciones, es decir "inestabilidad elástica debido a carga axial", o pandeo, un acontecimiento que haría que se colapsase el revestimiento en el recipiente, con el desprendimiento consiguiente del material compuesto de las paredes. Este fenómeno debe evitarse absolutamente, ya que conduciría, después de solo unas cuantas veces de que se cargue y se descargue el recipiente, al colapso total de las paredes del revestimiento de metal.

Para evitar este fenómeno, deben usarse materiales con bajo módulo de elasticidad. Esto ha conducido al uso de revestimientos que se componen de plástico o polímeros. Sin embargo, los recipientes que se componen de tales materiales de plástico o poliméricos no garantizan un sello perfecto, ya que los materiales poliméricos son permeables al gas. Además, las tecnologías existentes no permiten la fabricación de recipientes de grandes dimensiones (con diámetros de 2 a 3 m y longitudes superiores a 10-12 m). Incluso la unión de diversas porciones distintas del mismo recipiente, en particular las ojivas con las salidas, que deben componerse de metal, provoca problemas que son no fáciles de resolver, ya que el acoplamiento es problemático y se producen fugas localizadas.

A partir de las patentes DE 102011007361 y DE 102011076480, ha llegado a conocerse bien un tipo de tanque equipado con un revestimiento interior y una carcasa exterior que se compone de material compuesto, diseñado para aumentar tanto la capacidad del tanque como su resistencia a una alta presión interna. En efecto, los tanques que son el objeto de estas patentes están diseñados para usarse como tanques de almacenamiento de combustible gaseoso para la aplicación en la industria del automóvil, en particular están diseñados para contener hidrógeno en su estado gaseoso, especialmente a alta presión.

Dichas patentes dan a conocer el método de someter dichos tanques, y particularmente sus revestimientos, a un tratamiento de pretensado, es decir someter a un esfuerzo preliminar el revestimiento antes de llevar a cabo el método de autozunchado normal.

La primera de las patentes mencionadas anteriormente da a conocer un tratamiento preliminar del revestimiento en el que este último, antes de envolverse con el material compuesto, se comprime longitudinalmente para que se acorte; posteriormente, se envuelve con el material compuesto, que se calienta hasta que se polimeriza/estabiliza. El tanque se libera posteriormente de la condición de pretensado inicial (acortamiento debido a compresión) y se somete a tratamiento de autozunchado. En la práctica, con este tratamiento el revestimiento se comprime parcialmente con respecto a la carcasa exterior que se tensa inicialmente, una operación que anticipa en pequeña medida el tratamiento de autozunchado.

La segunda de las patentes mencionadas anteriormente da a conocer un tratamiento basado en pretensado unidireccional, que va seguido por un tratamiento de autozunchado, preferiblemente de manera iterativa de modo que no se someta a esfuerzo el material excesivamente.

Sin embargo, tales métodos, aunque representan una mejora definitiva con respecto a los métodos del estado de la técnica y están diseñados específicamente para la aplicación descrita, no son adecuados para la aplicación en tanques que tienen dimensiones mucho más grandes, y con presiones de funcionamiento mucho más grandes, del orden de cientos de bares. Lo que es más importante, no ofrecen mejoras significativas con respecto a la razón volumen/peso.

El documento DE 10 2006 051 376 da a conocer un recipiente de presión que tiene una pared, que se moldea a partir de una preforma mediante flujo cilíndrico que gira en dos desbordamientos. Se realiza una reducción de grosor de pared del cuarenta por ciento o más en un desbordamiento y en otro desbordamiento se realiza una reducción de grosor de pared del setenta por ciento o más. La preforma se fabrica opcionalmente a partir de un bloque mediante el procedimiento de extrusión de latas inverso de formación en caliente, a partir de una pieza en bruto de chapa de metal mediante embutición profunda o mediante prensado, y a partir de un tubo, cuya base se embute y se cierra sin material adicional.

Por tanto, sería deseable y es el principal objeto de la presente invención, concebir un método para la fabricación de tanques, que presente:

- un revestimiento interior diseñado como un recipiente de metal continuo sellado,
- y una carcasa exterior que consiste en una o más capas de material compuesto impregnado de manera adecuada,
- diseñado para ofrecer excelentes características de resistencia a la presión del gas introducido en dicho tanque,

- que es particularmente ventajoso en la fabricación de tanques de alta capacidad, del orden de unos cuantos m<sup>3</sup>,
- y que representa una mejora significativa en cuanto al grosor del revestimiento, es decir su peso y costes de fabricación,
- que puede fabricarse a partir de materiales compuestos híbridos, usando también fibras de vidrio que son particularmente económicas.

Además, dicho método debe ser sencillo y seguro de llevar a cabo, usando métodos bien conocidos.

Este y otros fines se logran por medio de un método y tanque relacionados, fabricado según las reivindicaciones adjuntas.

Las características y ventajas de la invención resultan evidentes en la siguiente descripción, proporcionada a modo de ejemplo no limitativo y que hace referencia a las figuras adjuntas, en las que:

- la figura 1 muestra una forma genérica y típica de la curva de elasticidad para algunos tipos de acero usados más habitualmente en la técnica;
- la figura 2 muestra un esquema simplificado de dos formas diferentes de la curva de elasticidad para un acero inoxidable austenítico cuando se somete a dos tratamientos de pretensado/endurecimiento por acritud diferentes y respectivos según la invención y usados habitualmente en la técnica;
- la figura 3 muestra un esquema simplificado de la forma experimental de tal material sometido a diferentes condiciones de endurecimiento por acritud;
- las figuras 4A, 4B y 4C muestran algunos esquemas extremadamente simplificados y simbólicos del mismo número de estados de funcionamiento de un molde de revestimiento pretensado según la invención;
- la figura 5 muestra una versión modificada y funcional de un método de dilatación de revestimiento con respecto a la figura 4B;
- la figura 6 es una ilustración simbólica de la primera etapa de un método de endurecimiento por acritud de revestimiento según la invención;
- la figura 7 muestra una vista en planta exterior simplificada del revestimiento fabricado después de la etapa mostrada en la figura 6;
- la figura 8 es una ilustración simbólica de la segunda etapa del método de endurecimiento por acritud de revestimiento después de la primera etapa según la figura 6 anterior;
- la figura 9 muestra una vista en planta exterior simplificada del revestimiento fabricado después de la segunda etapa mostrada en la figura 8;
- la figura 10 muestra simbólicamente una realización mejorada de un molde de producción y un revestimiento relacionado;
- la figura 11 muestra esquemáticamente una porción de una realización mejorada diferente de la pared exterior del revestimiento de la figura 10;
- la figura 12 muestra esquemáticamente el perfil del módulo de elasticidad de algunos materiales que se usan preferiblemente para llevar a cabo un revestimiento según la invención;
- la figura 13 muestra esquemáticamente la colocación y los perfiles de las curvas de carga de los materiales de la figura 13, según una etapa de producción mejorada de la invención;
- la figura 14 muestra una ampliación de una porción de la pared exterior de un revestimiento mostrado generalmente en la figura 10;
- la figura 14A muestra una porción de extremo de un revestimiento cuya pared está dotada de surcos mostrados a modo de ejemplo en la figura 14.

La descripción y las reivindicaciones que siguen se refieren a un tanque hipotético que consiste en un revestimiento interior y una carcasa exterior que se compone de material compuesto.

El revestimiento pretende fabricarse usando materiales convencionales tales como aleaciones de aluminio o acero, y según las tecnologías de fabricación actuales, tales como soldando diferentes chapas de metal conformadas de manera adecuada, o una única pieza obtenida a partir de la chapa de metal, tubo o tocho usando tecnologías del estado de la técnica para definir este tipo de componente; además, también se pretende que tanto dicho revestimiento como la carcasa exterior correspondiente que se compone de material compuesto sean de forma cilíndrica, aunque obviamente esta simplificación se hace con el único fin de facilitar esta descripción, puesto que los tanques que evitan el peligro de pandeo, especialmente cuando el revestimiento es muy delgado y el esfuerzo de compresión al que está sometido es muy alto.

Para construir recipientes de gran tamaño con presiones de funcionamiento de 300 bares o más, sin fugas, con pesos mínimos, dimensiones internas máximas y costes mínimos, es necesario, según la presente línea de razonamiento, usar un revestimiento de metal, reduciendo tanto como sea posible tanto el grosor del material compuesto (conservando los coeficientes de seguridad adoptados) como el grosor de las paredes del revestimiento, mientras se evita el peligro de pandeo, especialmente cuando el revestimiento es muy delgado y el esfuerzo de compresión al que está sometido es muy alto.

En algunos casos, el transporte de gas natural comprimido (GNC) plantea los problemas de corrosión por tracción y fragilidad debido a hidrógeno naciente. Los materiales más adecuados en este caso son determinadas aleaciones de aluminio y aceros inoxidables austeníticos, que son muy resistentes a casi todos los ataques químicos. Estos últimos, por debajo de 50°C, pueden proporcionar bastante resistencia incluso al ataque por iones Cl<sup>-</sup>, es decir en presencia de agua de mar.

Con referencia a la figura 1, que muestra la forma de la curva de elasticidad para diversos tipos de acero, usados habitualmente en la técnica, que se han sometido previamente a tratamientos de endurecimiento por acritud, es decir alargamiento bajo carga: resulta completamente evidente que estas curvas pueden variar enormemente entre sí, y que esta diferencia resulta no sólo de su naturaleza, lo que es obvio, sino también, en un grado significativo, del grado o la profundidad del tratamiento de endurecimiento por acritud propuesto.

Con referencia a la figura 3, puede observarse que, si se consideran los puntos A, B, C, que identifican la condición del material respectivo en la que se produce la transición del campo de comportamiento elástico al campo de comportamiento plástico (es decir, deformación permanente), estos puntos están ubicados en coordenadas x respectivas y diferentes, es decir con valores de alargamiento  $\varepsilon$  respectivos y diferentes (eje horizontal). Observando dichas curvas puede percibirse que, a medida que aumenta el grado de endurecimiento por acritud, aumenta el campo de elasticidad, es decir aumenta la deformación de campo elástico antes de que se alcance el campo plástico.

Con referencia a la figura 2, si se observa una ampliación de una reconstrucción gráfica esquemática de dos de tales curvas, con referencia a un tipo de acero particular, puede observarse mejor la situación descrita anteriormente.

La curva "H" representa la forma elástica de un acero de base en el estado recocido, y la curva "K" representa la forma elástica del mismo tipo de acero, aunque sometido previamente a endurecimiento por acritud hasta un valor intermedio (denominado convencionalmente a continuación en el presente documento 1/2H).

Tal como puede percibirse, para alcanzar una deformación  $\varepsilon$  residual, es decir una deformación permanente, después de retirarse el esfuerzo de tracción, igual al 0,2%, ubicado en el punto "D1" en el eje X (límite de elasticidad convencional), debe aplicarse una deformación de aproximadamente el 0,37% (punto "D2") en el material no endurecido, de base.

Si, por otro lado, el mismo material se somete previamente a endurecimiento por acritud, para lograr la misma deformación residual, debe imponerse un alargamiento de casi el 0,65%, correspondiente al punto "D3" en el eje X, es decir un valor considerablemente mayor.

Con respecto al comportamiento de dichos materiales después de la retirada del esfuerzo, y especialmente el retorno desde el punto "D2" hasta el punto "D1", y el retorno análogo desde el punto "D3" hasta el punto "D1", esto es conocimiento común, que se conoce bien en la técnica, y por tanto se omitirá para mayor brevedad.

Los aceros inoxidables austeníticos, y particularmente AISI 304, presentan, además de propiedades de resistencia al ataque químico y excelente soldabilidad, determinadas características mecánicas particulares que hacen que sean adecuados para su uso en la fabricación de revestimientos para recipientes destinados a envolverse posteriormente con una o más capas de material compuesto. De hecho, este tipo de acero inoxidable austenítico, si se somete a endurecimiento por acritud, modifica radicalmente sus propiedades mecánicas.

Tal como se muestra en la figura 3, que representa esquemáticamente la curva experimental de este material sometido a diversas condiciones de endurecimiento por acritud, puede observarse que, partiendo del material en su estado recocido o solubilizado (curva inferior), si el material de base se somete a tres tasas diferentes de

endurecimiento por acritud (1/4H; 1/2H; 2/3H), se obtienen cargas de rotura y niveles de fragilidad cada vez mayores, al tiempo que el material mantiene una reserva notoria de plasticidad residual.

En el caso de la curva identificada como "2/3H", hay un alargamiento a la rotura de alrededor del 10%, es decir similar al de un acero al carbono de baja aleación habitual, no sometido a endurecimiento por acritud.

Volviendo a la figura 2; siguiendo la misma línea de razonamiento descrita anteriormente, si se desea lograr una deformación en el intervalo del 1-1,1 % bajo carga (este valor del 1,1% es el valor del punto D4 en el eje X), se tendrían dos deformaciones residuales "potenciales", dependiendo de si el acero se ha sometido previamente o no a endurecimiento por acritud, y exactamente:

- de aproximadamente el 0,92% (punto "D5"), para el material no sometido a endurecimiento por acritud, de base,
- y de aproximadamente el 0,64% (punto D6) para el material sometido a endurecimiento por acritud.

En esencia, y para abreviar, ahora puede verificarse que la distancia entre dichos puntos D5 y D6 representa la "ganancia", es decir la ventaja del tratamiento de endurecimiento por acritud, que consiste en menor alargamiento residual del acero sometido previamente a endurecimiento por acritud, en comparación con el acero de base (el valor en el eje X de D6 es del 0,64%, menor que el valor de D5, el 0,92%).

Esta propiedad, es decir la deformación residual notablemente reducida, junto con el método de alargamiento al que se ha sometido el material, combinado con la constancia sustancial de la carga de rotura, es la base para la presente invención.

De hecho, la esencia de la invención se basa en la observación que la deformación del 1-1,1% bajo carga corresponde casi exactamente a la deformación de autozunchado que se realiza normalmente en el recipiente terminado después de haberse envuelto con el material compuesto, y que naturalmente también se desea imponer al revestimiento.

Sin embargo, si un recipiente, fabricado usando un tipo de acero como el especificado, se somete previamente a endurecimiento por acritud en un grado significativo (figura 2, curva "K") antes de terminarse con una envoltura convencional de material compuesto, cuando se libera la presión de autozunchado, el estado de tensión del material compuesto será menor, debido a la menor deformación permanente del revestimiento subyacente, que la que habría si no se llevara a cabo dicho método de endurecimiento por acritud. Por consiguiente, también se reducirá considerablemente el grado de compresión sostenido por las paredes del revestimiento.

Calculando adecuadamente los grosores del revestimiento y el material compuesto, combinando diferentes tipos de fibras para obtener módulos de elasticidad apropiados, y sometiendo el acero del revestimiento a un tratamiento de endurecimiento por acritud adecuado antes de proceder con el método de envoltura y de autozunchado, es posible obtener un recipiente caracterizado por peso y coste mínimos con una carga útil máxima, permaneciendo iguales todas las demás condiciones (es decir, misma presión de funcionamiento, coeficiente de seguridad y dimensiones externas). Finalmente, también por medio de endurecimiento por acritud adecuado del acero del revestimiento, antes de proceder con la envoltura del revestimiento y realizar el autozunchado, puede imponerse tal estado de compresión sobre el mismo que la  $\sigma$  media esté tan próxima como sea posible a cero para aumentar la longevidad a la fatiga del revestimiento.

En la práctica, todavía con respecto a la figura 2, ahora resultará evidente que, habiendo definido un valor particular de deformación residual (punto D6), la presente invención permite que se identifique y ejecute el método de endurecimiento por acritud/preensado de modo que se obtenga la curva de elasticidad requerida y de modo que, durante un tratamiento de autozunchado posterior, el acero esté en la condición deseada.

En resumen, se "construye" la condición de endurecimiento por acritud que ha de realizarse en el acero yendo hacia atrás, según tanto la curva de elasticidad como el método de autozunchado posterior. Este último, de hecho, permite la selección del punto óptimo de deformación residual D6, a partir de ese punto D4, y por tanto se calcula el valor del endurecimiento por acritud que ha de realizarse en el material.

Como alternativa a la solución descrita anteriormente, de un endurecimiento por acritud preliminar del revestimiento, debe aumentarse el grosor del revestimiento, permaneciendo iguales todas las demás condiciones, para reducir las cargas específicas y, por tanto, los alargamientos. Sin embargo, esta solución, es decir aumentar el grosor del revestimiento, es exactamente lo que se desea evitar.

La presente invención resuelve este problema concibiendo un tanque equipado con un revestimiento convencional que, antes de envolverse con la capa de material compuesto, se somete a un tratamiento que consiste en endurecimiento por acritud/dilatación de la pared exterior relativa, que debe ser preferiblemente de forma cilíndrica.

Este método de dilatación ha de realizarse según el método tradicional, es decir dejando que entre un fluido,



preferiblemente un líquido, en el interior del revestimiento, y sometiendo este líquido a una presión muy alta, para deformar la superficie cilíndrica del revestimiento, expandiéndolo de manera circunferencial y axialmente; en la práctica se expanden tanto el diámetro como la longitud del revestimiento básicamente cilíndrico.

- 5 Mediante estos medios, el volumen interno aumenta obviamente de manera significativa, sin aumentar sin embargo la masa, y por tanto el peso, del revestimiento. Lo que es uno de los resultados que se desea obtener.

Según la invención, este resultado puede obtenerse por medio de los siguientes procedimientos y métodos:

- 10 • en primer lugar, para la fabricación del revestimiento es necesario seleccionar y usar un acero que presenta el comportamiento más dúctil posible, es decir en el que el alargamiento a la rotura puede alcanzar hasta el 50%. Este requisito se debe a la necesidad mencionada anteriormente, es decir, el metal del que se compone el revestimiento debe poder expandirse/dilatarse en gran medida al tiempo que se mantiene una reserva suficiente de deformabilidad, y permanece dentro de un intervalo de deformación que está muy lejos del punto de rotura, evitando por tanto fenómenos de fragilidad que afectarían de manera adversa a la longevidad a la fatiga;
- 15 • en segundo lugar y de manera simultánea, durante este método de expansión debe permitirse que el material logre una condición sometida a endurecimiento por acritud de manera adecuada, para aumentar su campo elástico uniformemente y en ambas direcciones (axial y circunferencial).
- 20

En efecto, es necesario observar una de las condiciones fundamentales de esta invención, es decir que, con la etapa de expansión/dilatación descrita anteriormente, sea posible todavía estirar el revestimiento para un intervalo de elasticidad limitado pero adicional; este método debe ejecutarse durante una etapa de autozunchado posterior, después de haberse completado el recipiente y haberse envuelto con una capa de material compuesto. Mediante estos medios, después de haberse aplicado el material compuesto, durante la etapa de autozunchado, será posible calibrar la deformación permanente en las paredes del revestimiento (para reducirla) de modo que, cuando se libera la presión de autozunchado, el material compuesto no comprima excesivamente el metal de las paredes del revestimiento, impidiendo por tanto el riesgo de pandeo mencionado anteriormente.

25

30

Todo esto es válido principalmente para recipientes a presión sometidos a bajas temperaturas, a las que el revestimiento experimenta una contracción adicional.

35 Para obtener esta situación, es necesario elegir un tipo de acero que pueda reforzarse (es decir, someterse a endurecimiento por acritud) hasta un valor predeterminado. Este valor debe ser tal que, después de que se haya envuelto el revestimiento así deformado, con una capa convencional habitual de material compuesto, el punto de funcionamiento común de la curva del módulo de elasticidad respectivo, después del autozunchado, en condiciones de funcionamiento, satisface ambas de las siguientes condiciones:

- 40 • los dos materiales, acero y material compuesto, deben estar dentro del intervalo de su curva de elasticidad respectiva, también durante el ensayo de certificación hidráulico, en el que el valor puede alcanzar hasta el 150% del valor de la presión de funcionamiento;
- 45 • después del método de autozunchado posterior, y en condiciones de funcionamiento, el punto de funcionamiento de ambos materiales que comprenden la pared del tanque, incluyendo tanto el revestimiento como la capa de material compuesto, se halla:
- 50 • para el revestimiento, antes del nivel del límite de elasticidad, y más convenientemente con un valor de esfuerzo medio  $\sigma$  tal que el tensado  $/\sigma/$ , a la presión de funcionamiento, menos la compresión  $/\sigma/$  cuando el recipiente está vacío, está tan próximo como sea posible a 0;
- 55 • para el material compuesto, a la presión de funcionamiento,  $\sigma$  debe permanecer dentro de los límites impuestos por el coeficiente de seguridad adoptado.

Según la invención, con referencia a las figuras 4A, 4B y 4C, este tratamiento de pretensado, diseñado para hacer que el acero del revestimiento se expanda/dilate, se lleva a cabo usando un molde 1 externo, de forma cilíndrica si el revestimiento es básicamente cilíndrico, de tales dimensiones que no sólo encierre por completo el revestimiento 2, sino que también garantice que sigue habiendo un intervalo de dimensiones lineales y radiales "L", sustancialmente constantes a lo largo de la superficie cilíndrica del revestimiento, entre las paredes 3 interiores de dicho molde 1 y las superficies 4 exteriores del revestimiento.

60

En la práctica, el molde 1 exterior y el revestimiento 2 tienen geometrías cilíndricas básicamente coaxiales, que presentan una altura "A" similar, centradas de modo que la geometría interna, la del revestimiento 2, se aloja por completo dentro de la geometría externa, determinada por la pared 3 interior del molde 1.

65

Por tanto, entre estas dos geometrías, del revestimiento 2 y de la pared 3 interior del molde 1, se crea un espacio 12 hueco, básicamente en forma de anillo y alargado.

El método de la invención consiste en realizar dicho tratamiento de pretensado de revestimiento antes de envolver el revestimiento con el material compuesto, según las siguientes etapas ordenadas de manera sucesiva:

a) alojar el revestimiento 2 de acero dentro del molde 1 (con respecto a los criterios para la identificación del tipo ideal de acero, este asunto se aborda a continuación) (figura 4A);

b) cerrar completamente las dos mitades, 1A y 1B, del molde 1, de modo que definen una cavidad de molde cilíndrica que puede encerrar el recubrir el revestimiento 2 (figura 4B);

c) cerrar las compuertas de acceso del revestimiento (el revestimiento puede tener una o más compuertas, pero esta característica no es esencial para el procedimiento);

d) insertar un fluido en el revestimiento, que puede presurizarse; esto puede ser cualquier fluido adecuado para el fin, pero por motivos tanto técnicos como económicos es mucho mejor llenar el revestimiento con un líquido, que puede ser aceite, por ejemplo, aunque se prefiere agua, que es más ventajoso desde el punto de vista económico;

e) presurizar dicho fluido hasta que las paredes del revestimiento, particularmente toda su superficie cilíndrica, se dilatan y extienden hasta el punto en el que se encuentran con la superficie cilíndrica interior del molde 1, que bloquea la dilatación del revestimiento (figura 4C). En la práctica, un método conceptualmente similar al método de "soplado" universalmente usado, por ejemplo, para moldear por soplado botellas de plástico (PET) para uso doméstico, o al método técnico bien conocido de hidroconformación;

f) después de que el revestimiento alcance esta etapa, se despresuriza, se abre el molde 1 y se extrae el revestimiento del molde para someterse a tratamientos posteriores tal como se describe a continuación.

En este punto resulta evidente que, si el alargamiento (o expansión, dependiendo de qué medida se tenga en cuenta) ha alcanzado un punto en el que está, aunque sea por poco, dentro del intervalo de límite de elasticidad del metal, se habrá obtenido un revestimiento que presenta no sólo una superficie cilíndrica exterior con límite de elasticidad aumentado (acero endurecido por acritud), sino también con una expansión significativa de su volumen interno, pasando del valor (sólo para la parte cilíndrica):

$$V1=a.\pi.r^2$$

al nuevo valor:

$$V2=a.\pi.(r+L)^2$$

donde - r - representa el radio inicial del revestimiento cilíndrico, y - a - representa la altura, o longitud, de la superficie cilíndrica.

Tal como se mencionó anteriormente, L representa la distancia lineal entre la superficie del revestimiento y la superficie 3 interior del molde 1 antes de la dilatación/expansión. Por tanto, resulta evidente que el volumen interno del tanque puede aumentarse, incluso una magnitud significativa, sin aumentar en absoluto la cantidad, es decir el peso del material usado, y por tanto el coste, ya sea directo, es decir el coste de fabricación, o indirecto, es decir el coste de transporte.

Los medios y métodos adoptados para realizar el método de endurecimiento por acritud descrito anteriormente pueden mejorarse ventajosamente basándose en las siguientes consideraciones:

- se conoce bien que, durante el método de introducir un fluido (en este caso un líquido) en un recipiente cerrado (en este caso un revestimiento),
- cuando la presión en el interior de dicho recipiente aumenta rápidamente hasta un valor muy alto,
- mientras que la presión ejercida contra las paredes exteriores de dicho recipiente (en este caso en el interior de la cavidad 12 en forma de anillo creada entre las paredes 3 interiores de dicho molde 1 y las superficies 4 exteriores del revestimiento) permanece básicamente constante, a un valor progresivamente menor que el valor de la presión en el interior del revestimiento, puede producirse fácilmente una deformación irregular no deseada (como una "burbuja") en la superficie de dicho revestimiento.

Este fenómeno también puede provocar fácilmente una deformación final irregular del propio revestimiento, con el consiguiente endurecimiento por acritud irregular, mientras que la presente invención se basa en el avance regular

del método de endurecimiento por acritud.

Para evitar este riesgo, la mejora propuesta enseña cómo introducir en dicha cavidad 12 un fluido, preferiblemente un líquido, que rellena completamente dicha cavidad 12 y que se presuriza hasta una contrapresión ajustable, progresivamente creciente.

Dicha contrapresión en dicha cavidad debe aumentar a medida que aumenta la presión en el interior del revestimiento, específicamente la  $\Delta$  de presión contra las dos paredes del revestimiento debe permanecer ventajosamente constante o semiconstante, para garantizar que la deformación del revestimiento se produce de una manera uniforme:

- tanto a lo largo de toda la extensión del revestimiento,
- como a lo largo del tiempo, es decir que no hay picos de presión diferentes durante la etapa de presurización del revestimiento (endurecimiento por acritud).

Este método, en sí mismo, está dentro del alcance de los expertos en la industria, por tanto se omiten los detalles de ejecución por brevedad.

Sin embargo, resulta conveniente indicar en este caso que, con la presente mejora, y con referencia a la figura 5, en el cuerpo 1B del molde, debe proporcionarse un canal 13 con el fin de permitir la introducción en dicha cavidad 12 de fluido a la contrapresión requerida, para ajustarse según el aumento de presión en el interior del revestimiento.

Obsérvese ahora figura 3, que muestra tres curvas C1, C2, C3, cada una de las cuales representa una curva de elasticidad respectiva posible para un único revestimiento, fabricado usando el mismo material, en las que cada curva representa el grado de endurecimiento por acritud que puede obtenerse usando 3 moldes diferentes de dimensiones diferentes, en las que la curva C1 representa la curva de carga que puede obtenerse con el menor alargamiento del material, y C3 representa la curva de carga que puede obtenerse con el mayor alargamiento del material.

Con el fin de evitar cualquier confusión, el método puede mostrarse a modo de ejemplo de la siguiente manera: si se realizan tres revestimientos completamente idénticos, usando el mismo tipo de material así como teniendo las mismas dimensiones, y si se someten dichos revestimientos al método descrito anteriormente, usando, sin embargo, tres moldes que difieren unos de otros sólo con respecto al tamaño de "L", es decir la anchura o la longitud radial de la cavidad inicial entre el revestimiento y la superficie interior del molde, pueden obtenerse las 3 curvas descritas anteriormente, en las que cada curva muestra la curva de carga de cada revestimiento tras el tratamiento de pretensado o endurecimiento por acritud respectivo descrito anteriormente.

Por tanto, basándose en la naturaleza y el grosor del material compuesto, en las características del método de autozunchado y en la presión de funcionamiento, las curvas mostradas en la figura 3 permiten identificar, para cada tipo de acero, el grado de endurecimiento por acritud requerido con el fin de satisfacer esos requisitos.

En resumen, la intersección de una  $\sigma$  dada y una  $\varepsilon$  particular identifica, para cada tipo de material, una curva respectiva y, por tanto, un grado respectivo de endurecimiento por acritud, y por consiguiente, un tamaño respectivo de molde que va a usarse.

Con respecto al método y los medios que van a usarse con el fin de realizar el tratamiento de pretensado/endurecimiento por acritud descrito anteriormente, el lector con experiencia habrá observado que dicho endurecimiento por acritud no puede obtenerse con una única dilatación no diferenciada de las paredes del revestimiento, ya que este último consiste, más o menos, en una superficie cilíndrica central y dos superficies de extremo semiesféricas.

Por tanto, teniendo en cuenta el grado de resistencia diferente proporcionado por estas superficies diferentes, la simple introducción de líquido presurizado en el interior del revestimiento, sin ninguna medida adicional, producirá inevitablemente un endurecimiento por acritud/deformación diferenciado en las diferentes partes de las paredes del revestimiento, y por tanto una deformación aceptable y óptima en parte de la superficie, pero no una óptima en la parte restante.

Con el fin de superar este inconveniente, se somete el revestimiento a un método de endurecimiento por acritud que presenta dos etapas posteriores, en el que:

- durante la primera etapa, se dilata/endurece por acritud una porción inicial del revestimiento, al tiempo que se garantiza que la otra porción se protege o bloquea artificialmente de modo que no presenta ningún esfuerzo por la dilatación relacionada,
- posteriormente, se lleva a cabo una segunda etapa, en la que se invierten las operaciones anteriores, es decir se

bloquea la primera parte del revestimiento, anteriormente endurecida por acritud, y se evita que se dilate, mientras que se somete la segunda parte, aún no endurecida por acritud, al tratamiento de deformación.

Con referencia a las figuras 6 a 9, se prepara un molde 20 inicial con este fin, que tiene perfiles y dimensiones globales tales que, cuando se cierra alrededor del revestimiento 2, tal como se muestra en la figura 6, las dos partes 20A del molde, que están enfrentadas a las porciones 2A de extremo semiesféricas del revestimiento 2, presentan la misma dimensión de longitudinal "M" que dichas porciones 2A de extremo semiesféricas respectivas del revestimiento 2.

La porción cilíndrica del revestimiento presenta, además, una primera dimensión interna "D-1". A diferencia de dicha porción cilíndrica, la parte 2B cilíndrica del revestimiento adopta una posición a una distancia "D-2", correspondiente a la deformación final requerida.

Así encerrado, el revestimiento se somete a continuación a la presión interna necesaria hasta que la porción 2B cilíndrica del revestimiento se expande hasta un punto en el que entra en contacto con la superficie 20B cilíndrica opuesta del molde, logrando por tanto la dimensión radial final deseada.

Tras dicha etapa de deformación inicial, el revestimiento adopta la forma mostrada en la figura 7, en la que la forma final de la porción de superficie cilíndrica del revestimiento se identifica como "20C"; en esta condición el diámetro "D3" de dicha porción cilíndrica corresponderá evidentemente a la suma del diámetro inicial "D-1" y el doble de dichas distancias "D-2".

En esta etapa inicial la porción 2A semiesférica del revestimiento sólo se modifica marginalmente, ya que su dimensión longitudinal "M" permanece bloqueada por dichas porciones 20A de superficie del molde, mientras que se fuerzan las dos porciones de perímetro relacionadas a seguir la dilatación de la porción de superficie cilíndrica del revestimiento hasta dicha dimensión "D3".

Posteriormente, se extrae el revestimiento del molde 20 y se introduce en un segundo molde 30, tal como se muestra en la figura 8, que presenta una superficie cilíndrica de dimensiones tales que, cuando se cierra dicho molde 30 alrededor del revestimiento anteriormente sometido al método tal como se describió anteriormente:

- dicha superficie 20C cilíndrica, ya deformada, se adapta perfectamente y hace tope con la superficie 30A interior de dicho segundo molde 30,

- mientras que las porciones 30B de extremo semiesféricas del segundo molde adoptan una posición a una distancia predeterminada "P" de las superficies 2A semiesféricas correspondientes, aún no deformadas, del revestimiento.

En este punto, el interior del revestimiento se presuriza de nuevo con el fin de poner dichas superficies 2A semiesféricas de vuelta en contacto y tope con dichas porciones 30B de extremo semiesféricas del segundo molde 30.

Al final de dicha segunda etapa de dilatación/endurecimiento por acritud, el revestimiento será tal como se muestra en la figura 9, es decir, en resumen, presentará un diámetro de la porción cilíndrica equivalente a dicho "D-3", y una longitud total "LT" (véase la figura 9) equivalente a la longitud original "LO" del revestimiento (véase la figura 8) aumentado en dos veces dicha distancia predeterminada "P".

En conclusión, al final de dicha segunda etapa todo el revestimiento se deforma en su totalidad de la manera deseada, es decir con radios de deformación diferenciados y presiones de deformación uniformes, diseñado de manera intencionada para lograr una deformación/endurecimiento por acritud global predeterminado.

Con respecto a los materiales que van a usarse, los tipos más adecuados son los aceros inoxidables austeníticos, incluyendo los de tipo dúplex; más específicamente, el mejor acero identificado para este fin es AISI 304, preferiblemente en su versión más soldable AISI 304L, caracterizado por un contenido en carbono muy bajo.

El término "acero dúplex" identifica un tipo de acero inoxidable austenítico de alta resistencia, bien conocido en la técnica con ese nombre, por tanto sus características específicas se omiten aquí por brevedad.

Se ha mostrado experimentalmente que los métodos anteriormente descritos son totalmente adecuados para el fin de lograr los objetivos de la invención; sin embargo, también se ha determinado que pueden obtenerse fácilmente resultados de método significativamente mejorados usando acero, del tipo especificado anteriormente, que se ha sometido previamente a dos tratamientos térmicos específicos:

- el primer tratamiento térmico es la "solubilización", es decir la difusión de carburos en la austenita; este tratamiento se realiza con el fin de obtener una aleación más blanda, más dúctil, por tanto más fácilmente mecanizable;

- el segundo tratamiento, recocido, consiste en calentar el acero hasta una temperatura que es menor que la

temperatura de fusión, seguido por una etapa de enfriamiento lento y/o controlado; este segundo tratamiento térmico se realiza con el fin de eliminar los esfuerzos residuales internos y cancelar los efectos de la deformación plástica, que puede haberse provocado por soldaduras o tratamientos térmicos anteriores que pueden haber producido esfuerzos internos localizados.

5 Dado que tales tratamientos de solubilización y recocido se conocen bien y se usan ampliamente en la técnica, se omite una descripción detallada de los mismos.

10 Finalmente, también es necesario considerar si podría ser más ventajoso realizar dichos tratamientos térmicos y mecánicos, particularmente endurecimiento por acritud/pretensado, no en el revestimiento ya formado como tanque semiacabado (que carece de la envoltura final de material compuesto), sino más bien en las chapas individuales de metal que deben soldarse inevitablemente entre sí con el fin de producir el revestimiento.

15 De hecho, llevar a cabo el tratamiento de endurecimiento por acritud/pretensado en las chapas de metal individuales, antes de soldarse entre sí para formar el revestimiento, ahorra dinero y mejora la eficacia y productividad, especialmente ya que evita la necesidad de proporcionar moldes adicionalmente grandes para llevar a cabo el método de endurecimiento por acritud descrito anteriormente.

20 La posibilidad de endurecimiento por acritud de las chapas de metal individuales antes de soldarse entre sí es un procedimiento bien conocido en la técnica, que hace uso de un método de laminado en frío de tipo bidimensional que se realiza en dos etapas independientes en la misma chapa de metal, para garantizar un endurecimiento por acritud controlable y uniforme por toda la superficie de la chapa.

25 Dado que el método de endurecimiento por acritud de cada chapa de metal individual mediante laminado en frío en dos o más etapas se conoce bien en la técnica, no se describe aquí en detalle.

En esencia, el método de la invención hace posible:

- 30 • dilatar/endurecer por acritud la parte externa del revestimiento para obtener el aumento sustancial deseado del volumen interno del tanque, cuyo revestimiento constituye la camisa interior, sin aumentar el grosor, sino al contrario reduciéndolo, y por tanto manteniendo dentro de límites aceptables el peso y coste del propio revestimiento,
- 35 • simultáneamente, llevar a cabo dicha dilatación usando métodos y materiales tales que la dilatación obtenida no afecta negativamente a los objetivos del tratamiento de autozunchado posterior, es decir sigue siendo posible someter dicho revestimiento previamente sometido a esfuerzo (por tanto previamente dilatado) a un tratamiento de autozunchado convencional,
- 40 • naturalmente, tras haber envuelto dicho revestimiento con una capa convencional de material compuesto, bien conocida en la técnica,
- 45 • mientras que todavía sigue siendo posible llevar a cabo un segundo tensado de todo el tanque de tal manera que el revestimiento, tras dicho segundo tensado por autozunchado, todavía conserva la capacidad de contraerse una determinada magnitud, debido al comportamiento elástico que todavía presenta gracias a las características del material usado, sin entrar, sin embargo, en el campo de inestabilidad elástica con el consiguiente riesgo de pandeo.

50 Además, el tratamiento de pretensado descrito anteriormente ofrece ventajas adicionales, ya que cualquier defecto en la estructura metálica del revestimiento se vuelve inmediatamente evidente; en particular, de ese modo se lleva a cabo un ensayo de sellado, y se identifica automáticamente cualquier imperfección en las soldaduras del revestimiento.

55 Procediendo con la fabricación del tanque, al final de dicho método independiente de pretensado del revestimiento, este último se envuelve con una o más capas de material compuesto adecuado, y el tanque, así completado, se somete a un tratamiento de autozunchado, que puede llevarse a cabo por consiguiente sin comprometer las características del tanque, permitiendo la precompresión deseada del revestimiento, lo cual permite la introducción de gas a alta presión con el resultado de que el revestimiento abandona el estado de precompresión, pasa por un estado de compresión cero y finalmente alcanza un estado de tensado normal, pero con un valor de tensión que está reducido, incluso en una gran magnitud, en comparación con el estado en el que estaría si no se hubiera llevado a cabo el tratamiento de autozunchado.

65 En el método de construcción de prototipos y experimentación con los mismos en un entorno real, con el fin de verificar la sistematicidad de las evaluaciones y las hipótesis de la invención descritas anteriormente, y considerando además elementos adicionales que, en sí mismos, se conocen bien en la técnica, se han identificado mejoras adicionales en el método de construcción del revestimiento y el tanque correspondiente y se describen a continuación en el presente documento:

A) La primera de tales mejoras se debe al hecho de que, tras el tratamiento de endurecimiento por acritud anterior por medio de pretensado, el grosor de pared del revestimiento es claramente más delgado en comparación con su grosor antes del endurecimiento por acritud; de hecho, esto es exactamente lo que se pretendía lograr por medio de dicho endurecimiento por acritud. Sin embargo, este tratamiento, además de la ventaja que acaba de describirse, también conlleva el inconveniente bien conocido de hacer que el revestimiento sea más vulnerable al efecto de pandeo, es decir el curvado hacia dentro, a modo de arco, de la pared de revestimiento, tras haberse envuelto la capa de material compuesto alrededor del mismo.

Este riesgo de pandeo resulta del hecho de que, tras el autozunchado anteriormente mencionado, dicha capa de material compuesto todavía está dentro de su campo elástico y por tanto ejerce una fuerza de compresión radial hacia dentro continua y significativa sobre el revestimiento subyacente. Con el fin de evitar esta situación peligrosa, se ha encontrado experimentalmente que, si la pared exterior del revestimiento, originalmente de forma cilíndrica, se forma de modo que adquiere un aspecto corrugado o con crestas y con surcos, que presenta una serie de surcos paralelos tal como se muestra en la figura 10, ofrece características considerablemente potenciadas de resistencia frente al pandeo en comparación con el revestimiento inicial, antes de dicha conformación.

De hecho, con referencia a las figuras 9 y 10 que muestran, respectivamente, un revestimiento antes de la conformación corrugada y el mismo revestimiento tras dicha conformación, experimentos repetidos han mostrado que la propensión al pandeo de la pared exterior del revestimiento disminuye significativamente tras haberse formado surcos en/corrugado dicha pared exterior, en comparación con la condición anterior en la que dicha pared era básicamente cilíndrica, sin surcos/no corrugada. Sin embargo, debe resultar fácilmente evidente que esta corrugación del revestimiento no debe realizarse tras haberse sometido este último al tratamiento de endurecimiento por acritud, que se ha descrito anteriormente de manera amplia, sino en el transcurso de dicho tratamiento de endurecimiento por acritud.

Con referencia a la figura 11, dicho tratamiento de endurecimiento por acritud debe por tanto llevarse a cabo usando moldes apropiados cuyas superficies interiores, que encierran y dan forma a la superficie lateral exterior del revestimiento, presentan corrugaciones numeradas 40, 41, 42, 43... respectivamente; estas corrugaciones están dispuestas a modo de anillo en forma de crestas y surcos que se encuentran en planos respectivos ortogonales al eje del revestimiento, por tanto están diseñadas como una imagen especular, "invertida", de las corrugaciones 40B, 41B, 42B, 43B... correspondientes que se desea obtener en la pared lateral del propio revestimiento.

De hecho, de este modo se obtiene una especie de formación de aros del revestimiento inicialmente cilíndrico; tal como se explicó anteriormente, el propósito de esta formación de aros es aumentar, y por tanto mejorar considerablemente, la rigidez radial hacia dentro del revestimiento, reduciendo por tanto el riesgo de pandeo, sin añadir nuevo material o realizar métodos adicionales con el fin de aplicar los "aros" por medio de lo cual se obtiene dicha formación de aros.

El propósito de la formación de aros es, en general, aumentar la resistencia de elementos estructurales que tienen una sección transversal anular, sometidos a esfuerzo radial ejercido hacia dentro; consiste básicamente en una envoltura continua o discontinua usando un material resistente a la deformación de manera adecuada.

Con referencia a la figura 11, se muestra la formación de aros de una forma diferente, en la que la sección transversal axial longitudinal del revestimiento muestra que las crestas de formación de aros consisten básicamente en las bandas 40C, 41C, 42C... exteriores que tienen la forma de trapezoides isósceles respectivos, mientras que, específicamente, tales "aros" consisten en los perfiles 40D, 41D, 42D... exteriores cilíndricos.

En el caso que está considerándose, la presencia de tal corrugación, independientemente de cómo se obtenga, equivalente a la "formación de aros", ofrece la ventaja de que, siendo el peso del revestimiento igual, su resistencia frente a deformaciones debidas a presiones ejercidas hacia dentro desde el exterior se aumenta significativamente; mediante estos medios, puede llevarse a cabo una magnitud limitada adicional de endurecimiento por acritud con el revestimiento, dando como resultado una reducción limitada adicional del grosor, es decir el peso, de la pared del revestimiento.

Resultará fácilmente evidente que esta oportunidad tiene una gran relevancia en las presentes circunstancias, en las que el propósito principal de la invención va dirigido específicamente a reducir el peso del revestimiento y del tanque respectivo, siendo todas las demás condiciones iguales.

También se ha observado que, dentro de determinados límites, el tamaño de la profundidad "H" de dicha corrugación/formación de aros mejora de manera correspondiente, y por tanto progresiva, aunque no lineal, la resistencia exterior del revestimiento relacionado; esta circunstancia puede usarse para determinar la profundidad de las corrugaciones/aros según el grado de resistencia que se desea obtener a partir del revestimiento, con respecto a los esfuerzos radiales internos provocados por la presión ejercida por el contenido de fluido.

Finalmente, también se ha observado una combinación ventajosa de razones entre las dimensiones de un

revestimiento sometido a unos métodos de corrugación/formación de aros tal como se describió anteriormente; de hecho, con referencia a la figura 14, se ha mostrado experimentalmente que la razón que ofrece los mejores resultados de funcionamiento, de anchura "L" de cada surco individual con respecto a su altura o profundidad "H", es decir la razón L/H, se encuentra dentro de un intervalo de 1 a 6, es decir  $1 \leq L/H \leq 6$ .

Además, se han identificado intervalos adicionales en las razones entre las diversas dimensiones del revestimiento en el que se han formado dichas corrugaciones; tales intervalos, cuando se verifican individualmente o en combinación, permiten una mejora significativa del rendimiento principal del revestimiento, es decir su resistencia frente a la dilatación radial mientras está en funcionamiento.

Las razones son:

- $3 \leq L/Re \leq 15$ ,
- $3 \leq L/Ri \leq 15$ ,
- $20 \leq R/H \leq 100$ ,

donde los símbolos usados se ilustran en la figura 14; en particular:

- Re representa el radio de curvatura entre la porción 50 plana, sin corrugar, de la superficie de revestimiento, y el lado 51 inclinado contiguo del surco 52 adyacente,
- Ri representa el radio de curvatura del vértice Vi inferior curvado entre los dos lados 51 y 53 inclinados contiguos del mismo surco 52.

Además, también se ha mostrado experimentalmente que las razones óptimas de radio R (véase la figura 14A) con respecto a grosor "S" de la pared corrugada se encuentran dentro del siguiente intervalo:

$$100 \leq R/S \leq 1250.$$

Incluso más específicamente, se ha encontrado que, para valores mínimos de "H" con respecto a la anchura "L" del surco (véase la relación anterior  $1 \leq L/H \leq 6$ ) donde L/H es aproximadamente igual a 6, es decir  $L/H \approx 6$ , pueden obtenerse resultados incluso mejores si R/S es aproximadamente igual a 100, es decir:

$$R/S \approx 100.$$

Si, por el otro lado,  $L/H \approx 1$ , entonces las mejores condiciones pueden obtenerse si se establece que  $R/S \approx 1250$ .

Las relaciones anteriores tienen que interpretarse en un sentido aproximado, en el sentido de que explican el hecho de que, permaneciendo otras condiciones y especialmente las características del revestimiento sin cambiar, la altura "H" de dichos surcos 40B, 41B, 42B, 43B... tiene que estar inversamente correlacionada, incluso de una manera no lineal, con el diámetro del revestimiento, es decir cuanto mayor es el grosor del revestimiento "S", menor tiene que ser la altura "H" de dicho surcos 40B, 41B, 42B, 43B...

Por tanto, la presente mejora ofrece una doble ventaja:

- por un lado, se aumenta significativamente la resistencia del revestimiento frente a la deformación hacia fuera, y esta ventaja se usa reduciendo de manera correspondiente, aunque no lineal, el peso del propio revestimiento, de modo que se vuelve al valor original de resistencia predefinida;
- la segunda ventaja consiste en el hecho de que, dado que dicho método de corrugación/formación de aros se lleva a cabo directamente por medio de moldes, no se necesita fabricar dispositivos de formación de aros especiales, por tanto se evita cualquier trabajo/operación adicional en relación con el ensamblaje de tales dispositivos.

Con seguridad los expertos en la industria deben haber constatado inmediatamente que tales ventajas técnicas se traducen inmediatamente en ventajas económicas considerables, teniendo en cuenta la mayor eficacia proporcionada por dichos tipos de revestimientos, tanto con respecto al rendimiento como a las técnicas de fabricación.

B) Con referencia a las figuras 12 y 13, se han concebido las siguientes mejoras y se describen a continuación en el presente documento:

Obsérvese la figura 12, que representa, de manera esquemática y simbólica, la curva del módulo de elasticidad, es

decir la forma en el plano cartesiano “ $\varepsilon$ ”, “ $\sigma$ ” de las curvas que representan el comportamiento de los siguientes tres materiales:

- acero inoxidable AISI 304L, cuyo módulo es aproximadamente  $E = 190.000 \text{ N/mm}^2$ ,
- fibra de carbono, fibra de vidrio, cuyo módulo es aproximadamente  $E = 160.000 \div 115.000 \text{ N/mm}^2$ ,
- fibra de vidrio continua, cuyo módulo es aproximadamente  $E = 40.000 \div 55.000 \text{ N/mm}^2$ .

Vienen a la mente las siguientes consideraciones: supóngase que, tras haber llevado a cabo el método de endurecimiento por acritud o pretensado con el revestimiento, este último se envuelve con una capa de material compuesto de fibra de vidrio continua y fibra de carbono, según la técnica. En estas condiciones, cuando se ha completado el tanque y se ha puesto en funcionamiento, es decir se ha presurizado a alta presión de aproximadamente 300 bar o incluso mayor, la expansión radial consiguiente del tanque se transmite de manera idéntica a la expansión radial de los dos materiales que forman la capa de material compuesto de fibra de vidrio y fibra de carbono. Y dado que el revestimiento se envuelve de manera circular con dichas fibras, esta expansión radial se transforma en una extensión longitudinal correspondiente e idéntica de las mismas fibras.

Sin embargo, los dos componentes de dicho capa de material compuesto, fibra de vidrio continua y fibra de carbono, se comportan de manera diferente con respecto a dicha extensión longitudinal idéntica.

Con referencia a la figura 12, puede observarse que, al mismo valor de dilatación “ $\varepsilon_1$ ” de los dos materiales compuestos de fibras que están comentándose, su reacción es significativamente diferente; de hecho el material compuesto de fibra de vidrio reacciona con un valor de esfuerzo “ $V_1$ ”, mientras que el material compuesto de fibra de carbono reacciona produciendo un valor de esfuerzo “ $C_1$ ”, que, teniendo en cuenta la diferencia entre el módulo de elasticidad respectivo, es significativamente mayor que “ $V_1$ ”.

Esto significa que el esfuerzo de expansión del revestimiento se transmite de una manera muy desequilibrada a los dos componentes de la envoltura de material compuesto, y más precisamente, la parte más grande del esfuerzo se ve contrarrestada por el material compuesto de fibra de carbono, en el punto “ $C_1$ ”, mientras que el material compuesto de fibra de vidrio continua se somete a mucha menos deformación, que alcanza el punto “ $V_1$ ”.

Por tanto, debe ser posible, como hipótesis inicial, simplificar todo el método de fabricación de la envoltura eliminando totalmente la fibra de vidrio, que no funciona o funciona insuficientemente, y usando exclusivamente la fibra de carbono.

Sin embargo, esta solución hipotética es totalmente inaceptable desde un punto de vista económico, por la simple razón evidente de que la fibra de carbono es mucho más cara, hasta aproximadamente 8-10 veces más cara que la magnitud en peso de fibra de vidrio; este factor elimina la posibilidad de usar material compuesto de fibra de carbono solo.

Como hipótesis opuesta, alternativa, entonces puede decidirse usar material compuesto de fibra de vidrio solo, empleando una mayor cantidad del mismo, suficiente para el fin; sin embargo, esta hipótesis también tiene que rechazarse, ya que va en contra del hecho de que la fibra de vidrio continua es mucho más pesada que la fibra de carbono, y mucho más si se considera que la magnitud de fibra de vidrio que se requerirá con el fin de resistir la presión de dilatación del revestimiento debe ser mucho mayor, considerando la diferencia significativa entre los dos módulos de elasticidad. Esta limitación es totalmente inaceptable por el simple hecho de que el todo el propósito de la presente invención es crear tanques completos que, al tiempo que proporcionen el mismo nivel de rendimiento, pesen mucho menos que los tanques producidos según la técnica conocida, y no más, como sería el caso si se usara fibra de vidrio continua sola.

Se han analizado todos los aspectos de la situación técnico-económica, y se ha identificado un método que permite lograr el compromiso óptimo en la fabricación del tanque completo, desde el punto de vista de sus costes globales y peso final.

La solución se describe de la siguiente manera: con referencia a la figura 13, tras haberse sometido al tratamiento de endurecimiento por acritud descrito anteriormente, el revestimiento, que ha vuelto a un estado de reposo, se envuelve inicialmente con una única capa relativamente ligera de material compuesto de fibra de vidrio, tras lo cual se somete a un tratamiento de autozunchado según la técnica.

Cuando se ha completado este tratamiento y el revestimiento ha vuelto de nuevo a un estado de reposo, la situación es la siguiente: en la figura 13 la capa de fibra de vidrio está en la condición de presentar un valor positivo “ $\sigma_v$ ”, dado que este último material ha permanecido siempre dentro de su campo elástico y, tras el tratamiento de autozunchado, ha vuelto casi a la condición original, desde el punto de vista de su deformación “ $\varepsilon$ ”, a pesar de someterse a deformación en extensión mediante el revestimiento subyacente.



Por otro lado, el revestimiento, al someterse a deformación en compresión por la envoltura de material compuesto de fibra de vidrio de recubrimiento, está en la condición representada en la figura 13 por el punto "σa", es decir, está en una condición de deformación negativa (compresión), pero sin presentar realmente ninguna deformación significativa (la coordenada x del punto "σa" es básicamente cero).

En este punto, tras el tratamiento de autozunchado previo con el material compuesto de fibra de vidrio solo, se envuelve el revestimiento con una capa adicional y final de fibra de carbono colocada sobre la capa de fibra de vidrio.

Esta envoltura final se realiza de una manera neutra, es decir sin ningún estiramiento o deformación del material compuesto de fibra de carbono, lo que se representa por el punto "σc" en la figura 13, evidentemente en el punto "0" (cero), dado que no se somete a ninguna deformación y por tanto no experimenta ninguna deformación.

Por tanto, en esta condición final el tanque completo está compuesto por los siguientes tres componentes:

- el acero del revestimiento, representado por la línea "A",
- el material compuesto de fibra de carbono, colocado de manera externa y representado por la línea "C",
- y el material compuesto de fibra de vidrio, colocado de manera intermedia entre las dos capas anteriores, y representado por la línea "V".

Cuando se pone dicho tanque en funcionamiento, es decir se presuriza, las condiciones de funcionamiento cambian, evidentemente, y los parámetros de los materiales elegidos pueden ajustarse de tal manera que cuando las nuevas condiciones de funcionamiento son tales que los puntos representativos de las condiciones de los dos materiales de envoltura de fibra, a lo largo de las líneas respectivas "V" y "C", se encuentran aproximadamente dentro del mismo intervalo limitado por la línea cerrada "Z". Entonces dicha línea cerrada representa una zona de funcionamiento posible de los dos materiales compuestos considerados.

Por tanto, resulta evidente, en este caso, que se obtiene la condición deseada, es decir que cuando la deformación sobre el acero del revestimiento llega a ser cero, y se encuentra en el punto "A1", porque anteriormente estaba bajo compresión, es decir con "σa" negativo, entonces las deformaciones a lo largo del eje vertical de "σ" en los dos tipos de envoltura, la fibra de vidrio y la fibra de carbono, adoptan un valor similar; lo que demuestra que la deformación por dilatación del revestimiento subyacente se ve compensada de una manera básicamente similar por las dos capas diferentes de fibras de envoltura.

Este método de formación del tanque es válido en general ya que impide usar cantidades de material de envoltura superiores a lo que se requiere desde el punto de vista de la deformación respectiva. Sin embargo, resulta evidente que este método de diseño general debe ajustarse de manera fina y calibrarse según los requisitos, para cubrir todas las posibles variables que pueden encontrarse, en particular el coste de los componentes, su peso y sus características mecánicas.

Sin embargo, se ha observado que este método hace posible lanzar un proyecto de una manera racional, ya que el problema de distribuir la carga del acero de revestimiento de una manera básicamente similar en ambos tipos de envoltura se resuelve de manera previa.

El método descrito anteriormente para la construcción de un tanque completo permite una mejora adicional; de hecho, tras haber envuelto el revestimiento subyacente, ya envuelto con una capa inicial de fibra de vidrio, con la capa final de fibra de carbono, se ha observado que las condiciones de funcionamiento generales, y particularmente las características de resistencia del tanque completo, pueden mejorarse adicionalmente si, en determinadas condiciones, y tras haberse envuelto el tanque con la capa de fibra de carbono según el método descrito anteriormente, se lleva a cabo un segundo tratamiento de autozunchado más limitado.

Este segundo tratamiento de autozunchado tiene el efecto, conocido en la técnica, de mejorar adicionalmente las características del tanque, ya que aumenta el valor de compresión inicial del acero de revestimiento en reposo sin comprometer las ventajas del tratamiento de autozunchado anterior realizado con el revestimiento envuelto sólo con la primera capa de fibra de vidrio.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que el uso de fibra de vidrio sólo se ha propuesto como material típico y preferido para cualquier mejora de la invención; sin embargo, tal como debe constatar cualquier experto en la industria, en principio puede emplearse cualquier otro material que presente características similares como alternativa a la fibra de vidrio continua.

En particular, se desea mencionar que el material conocido como "Kevlar", que presenta un módulo de elasticidad considerablemente inferior al de la fibra de carbono, puede emplearse de manera útil en lugar de esta última.

Las consideraciones anteriores se han elaborado y presentado basándose en evaluaciones meramente técnicas, que es aumentar en el mayor grado el valor de las características de funcionamiento del material usado.

- 5 Sin embargo, en el entorno de producción real las consideraciones anteriores no se consideran en sí mismas suficientes para sugerir una decisión definitiva en cuestión de producción; de hecho, dado que el propósito de la presente invención es mejorar el beneficio económico final global del tanque completo, evidentemente en la decisión de producción final no puede excluirse una evaluación estricta del coste de los diversos componentes.
- 10 En una evaluación de este tipo se obtuvo con evidencia contundente que el coste de la fibra de carbono es enormemente superior al coste de la fibra de vidrio, y que entonces la hipótesis que acaba de describirse de llevar a cabo una segunda capa con un material compuesto de fibra de carbono requiere un uso de una magnitud mayor del mismo material compuesto, ya que evidentemente la segunda capa es más ancha que la primera capa (las dos geometrías cilíndricas respectivas muestran radios respectivamente diferentes).
- 15 La conclusión final de esta situación será que el tanque completo así producido, aunque esté técnicamente optimizado desde el punto de vista del uso de material, no estará optimizado desde el punto de vista del coste global final.
- 20 Para identificar una solución global óptima, entonces se propone aquí la realización de producción en la que:
- la primera capa de cobertura del revestimiento anteriormente endurecido por acritud consiste en el material compuesto de fibra de carbono y resina epoxídica,
- 25 • la segunda capa de cobertura consiste evidentemente en un material compuesto de fibra de vidrio y resina epoxídica.
- Evidentemente, lo que acaba de mencionarse es válido si se implementan dos capas de material compuesto diferentes, con dos módulos elásticos diferentes.
- 30 Incluso en la circunstancia que acaba de considerarse las consideraciones anteriormente presentadas son válidas, es decir tras haber implementado la primera capa con el material compuesto de fibra de carbono y resina epoxídica, se somete el tanque así obtenido a un método de autozunchado, según la técnica anterior.
- 35 Además, todavía como en el caso anterior, y basándose en consideraciones técnico-económicas que tienen que basarse en cada caso específico, puede proporcionarse ventajosamente una capa adicional y final de material compuesto de fibra de vidrio sobre la primera capa de material compuesto de fibra de carbono.

# REIVINDICACIONES

1. Método para la producción de un tanque de alta resistencia que consiste en un revestimiento interior y una carcasa exterior, formándose dicho revestimiento (2) interior como un recipiente de metal cerrado que muestra una forma cilíndrica, sometiéndose las paredes exteriores de dicho revestimiento (2) interior a un tratamiento mecánico que puede implementar un endurecimiento por pretensado axial y longitudinal hasta un nivel predeterminado, comprendiendo dicho método las siguientes etapas:
  - a) proporcionar un molde (1) que tiene tamaños tales que su pared interior define internamente un volumen cilíndrico que puede alojar dicho revestimiento (2);
  - b) encerrar dicho revestimiento (2) en el interior de dicho molde (1);
  - c) encerrar totalmente dicho molde (1) de modo que dicho revestimiento (2) se cerrará en el interior del mismo;
  - d) cerrar las puertas de acceso de dicho revestimiento (2);
  - e) introducir en dicho revestimiento (2) un fluido que puede presurizarse;
  - f) someter dichas paredes (4) exteriores de dicho revestimiento (2) a dicho tratamiento mecánico presurizando dicho fluido hasta que las paredes (4) de dicho revestimiento (2), y particularmente toda su superficie cilíndrica, se expanden y se estiran hasta que se encuentran con la superficie (3) interior de dicho molde (1);estando dicho método caracterizado porque comprende las siguientes etapas:
  - g) despresurizar el volumen interior de dicho revestimiento (2) y retirar dicho recipiente del interior de dicho molde (1);
  - h) llevar a cabo una cobertura exterior de dicho revestimiento (2) mediante una o más capas de material compuesto, para formar dicha carcasa exterior
  - i) implementar en dicho tanque un tratamiento de autozunchado.
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque se define un nivel del tamaño, y preferiblemente del radio ( $r + L$ ) de la pared interior de dicho molde (1) tal que como el estiramiento lineal y radial ( $L$ ) del radio ( $r$ ) de la pared (4) de dicho revestimiento (2) es de tal tamaño que el material relevante cambia el campo elástico aumentando el nivel del límite de elasticidad hasta un valor predeterminado.
3. Método según la reivindicación 2, caracterizado porque el material que forma dicho revestimiento (2) es un acero que muestra alto alargamiento antes de alcanzar la condición del límite de elasticidad, y preferiblemente es un acero inoxidable austenítico, también de tipo dúplex.
4. Método según la reivindicación 3, cuando se selecciona acero inoxidable austenítico en el mismo, caracterizado porque dicho acero inoxidable austenítico es un acero que muestra características que son conformes o similares a las de un acero según la norma AISI 304, y preferiblemente es un acero más fácil de soldar (norma AISI 304L).
5. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque durante la etapa de presurización del interior de dicho revestimiento (2), se suministra una contrapresión ajustable, que actúa sobre la pared exterior del mismo revestimiento (2).
6. Método según la reivindicación 5, caracterizado porque dicha contrapresión ajustable se controla a un nivel para mantener una diferencia de presión entre el interior de dicho revestimiento y su superficie exterior dentro de valores predeterminados.
7. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque dicho tratamiento de autozunchado se lleva a cabo en el tanque completo de tal manera que el tensado resultante sobre el material de metal de dicho revestimiento (2) está comprendido dentro del campo de límite de elasticidad relevante.
8. Método según la reivindicación 3, caracterizado porque dicho tratamiento de pretensado de acero se lleva a cabo en dos etapas independientes a través de dos moldes (20, 30) diferentes, en el que en la primera etapa se introduce dicho revestimiento (2) en un primer molde (20) y se somete a una deformación controlada sólo en sentido circunferencial (20B), y en el que en la segunda etapa se introduce dicho revestimiento (2) en un segundo molde (30) y se somete a una deformación controlada que es básicamente

axial (P, LT).

- 5 9. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque dicho tratamiento de pretensado se lleva a cabo después de haberse sometido dicho revestimiento (2) a un tratamiento térmico de recocido/solubilización.
- 10 10. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque la pared de dicho revestimiento (2) se forma con una pluralidad de corrugaciones (40B, 41B, 42B...).
- 10 11. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque, después de dicho tratamiento de endurecimiento por pretensado, dicho revestimiento (2) se cubre mediante una primera capa de bajo módulo de elasticidad, preferiblemente fibra de vidrio continua, y luego dicho conjunto, formado por dicho revestimiento (2) y dicha primera capa, se somete a un tratamiento de autozunchado.
- 15 12. Método según la reivindicación 11, caracterizado porque, después de dicho tratamiento de autozunchado, dicho conjunto, formado por dicho revestimiento (2) y dicha primera capa, se cubre además mediante una segunda capa de módulo de elasticidad medio, y preferiblemente fibra de carbono o KEVLAR.
- 20 13. Método según la reivindicación 12, caracterizado porque, después de la cobertura mediante dicha segunda capa, dicho tanque se somete a un segundo tratamiento de autozunchado, que es preferiblemente de baja entidad.
- 25 14. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque, después de dicho tratamiento de endurecimiento por pretensado, dicho revestimiento (2) se cubre con una primera capa de material que muestra un alto módulo de elasticidad, preferiblemente material compuesto con fibra de carbono, y luego dicho conjunto que se compone de dicho revestimiento (2) y de dicha primera capa, se somete a un tratamiento de autozunchado.
- 30 15. Método según la reivindicación 11, caracterizado porque, después de dicho método de autozunchado, dicho conjunto, formado por dicho revestimiento (2) y dicha primera capa, se cubre además con una segunda capa que comprende una capa de material que muestra un bajo módulo de elasticidad, preferiblemente material compuesto con fibra de carbono.
- 35 16. Método según la reivindicación 10, caracterizado porque dicha pluralidad de corrugaciones se forman durante dicho tratamiento de endurecimiento por pretensado, siendo dicha pluralidad de corrugaciones básicamente circulares y paralelas, estando comprendida la razón entre la anchura "L" de cualquier ondulación individual y su altura o profundidad "H" en un intervalo entre 1 y 6 ( $1 \leq L/H \leq 6$ ).
- 40 17. Método según la reivindicación 10, caracterizado porque la razón entre la anchura "L" de cualquier corrugación individual y el radio de curvatura ( $R_e$ ) entre la porción plana y no corrugada de la pared del recipiente y el lado (51) inclinado contiguo de la corrugación (52) adyacente está comprendida en un intervalo entre 3 y 15 ( $3 \leq L/R_e \leq 15$ ).
- 45 18. Método según la reivindicación 10, caracterizado porque la razón entre la anchura "L" de cualquier corrugación individual y el radio de curvatura ( $R_i$ ) del vértice ( $V_i$ ) curvo inferior entre dos lados (51, 53) contiguos de la misma corrugación (52) está comprendida en un intervalo entre 3 y 15 ( $3 \leq L/R_i \leq 15$ ).
- 50 19. Método según la reivindicación 10, caracterizado porque la razón entre el radio "R" de dicho revestimiento (2) y la altura (H) de la corrugación respectiva está comprendida en un intervalo entre 20 y 100 ( $20 \leq R/H \leq 100$ ).
20. Método según la reivindicación 16, caracterizado porque la razón entre el radio "R" de dicho revestimiento y el grosor "S" de la pared exterior respectiva es de aproximadamente  $R/S = 100$  si tiene lugar la condición aproximada de que  $L/H = 6$ , y  $R/S = 1250$  si tiene lugar la condición aproximada de que  $UH = 1$ .

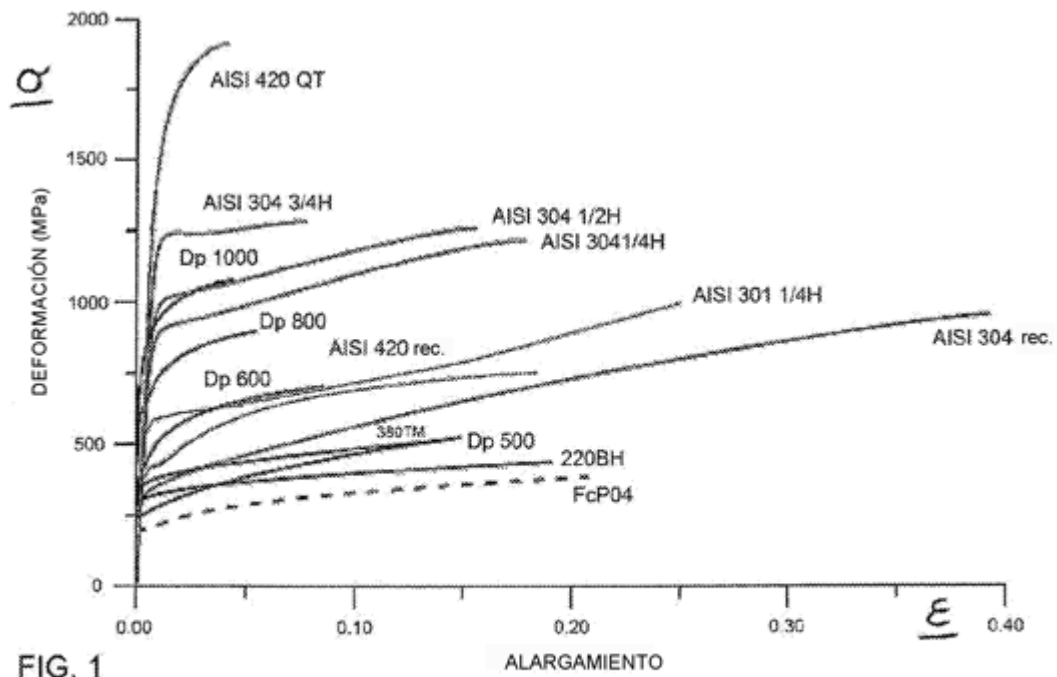


FIG. 1

FIG. 1: curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  para acero inoxidable y acero de carbono

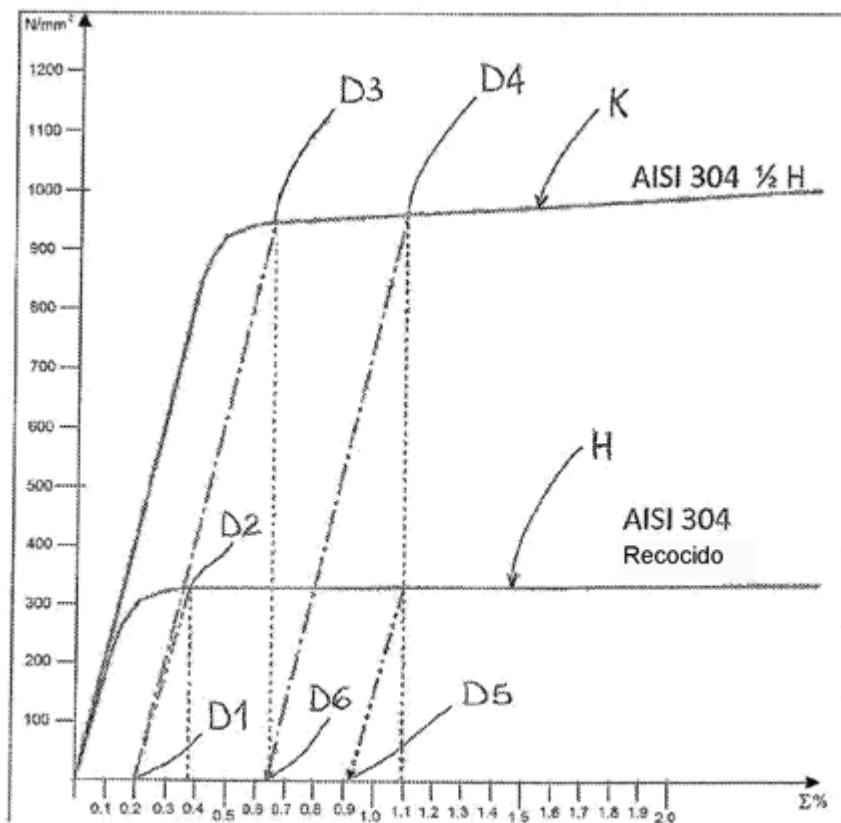


FIG. 2

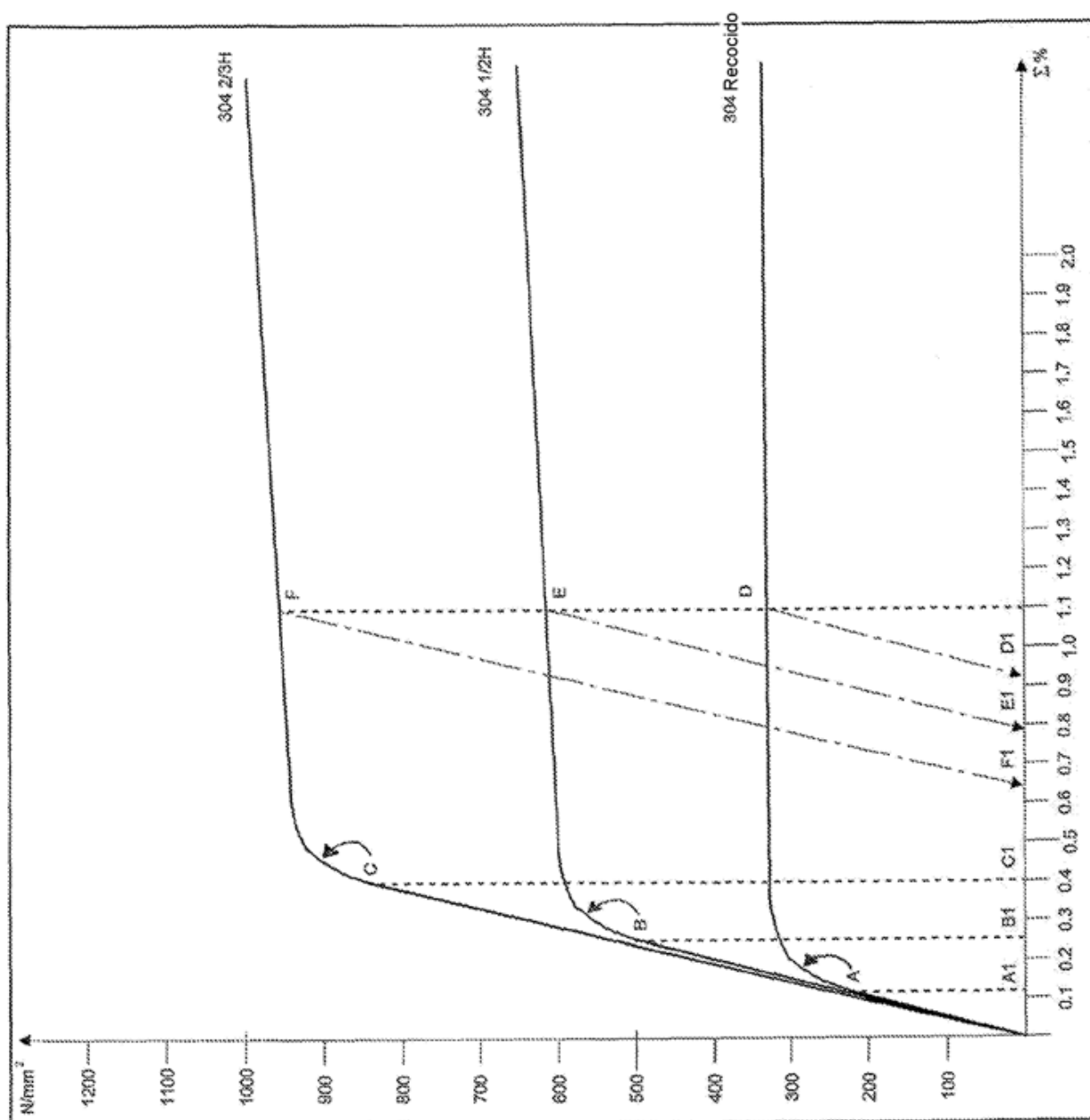


FIG. 3

FIG. 4 A

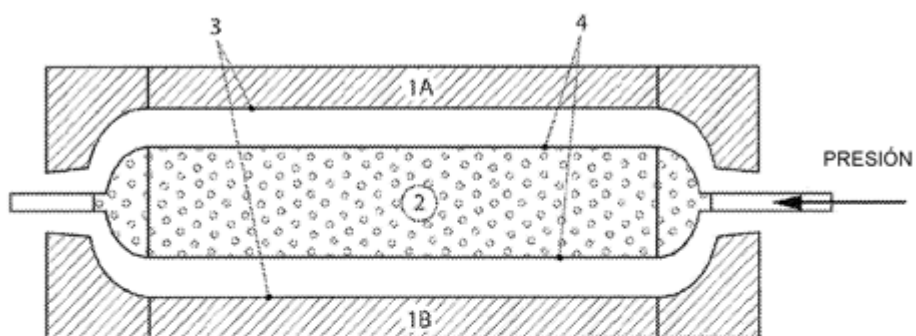


FIG. 4 B

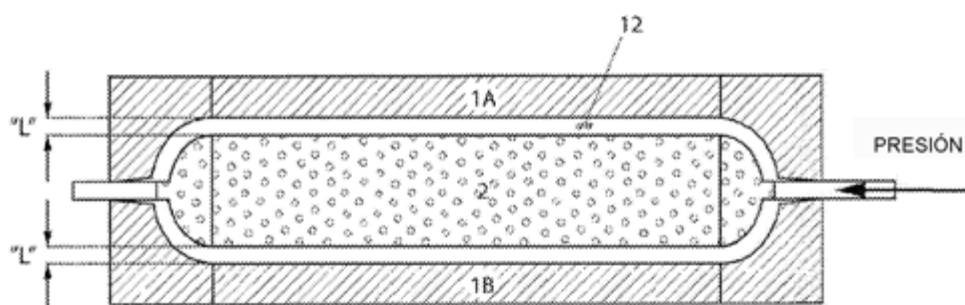


FIG. 4 C

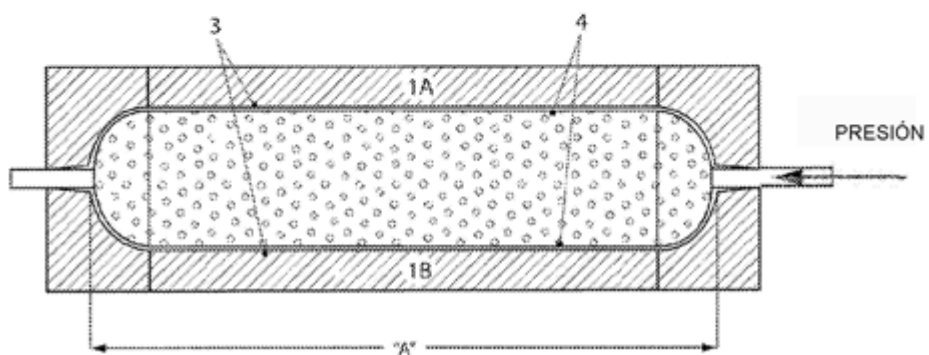


Fig. 5

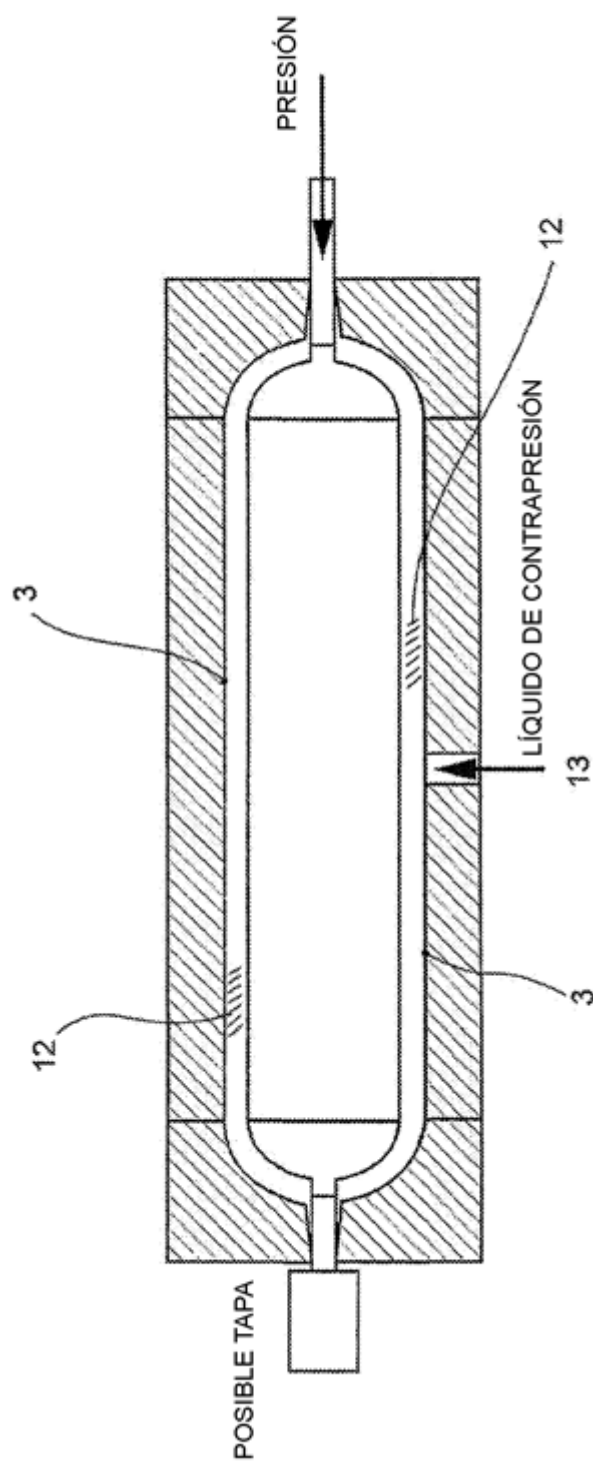




FIG. 6

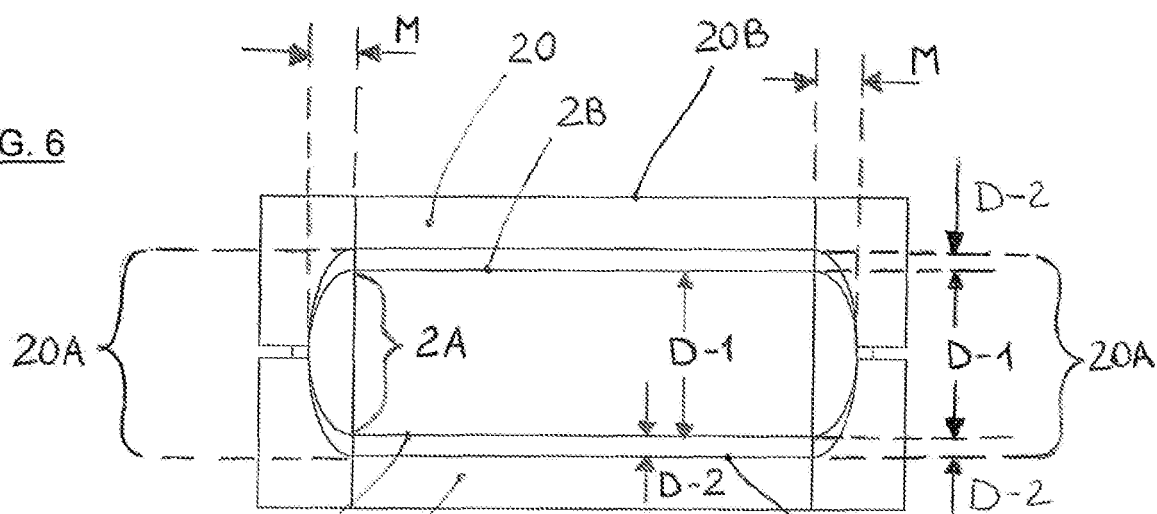


FIG. 7

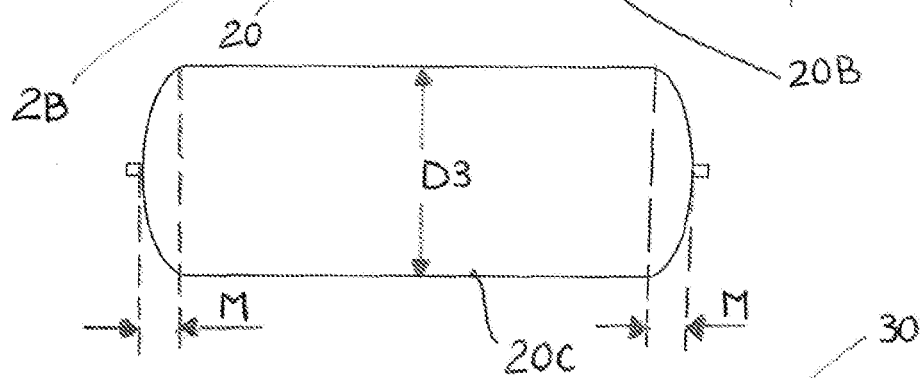


FIG. 8

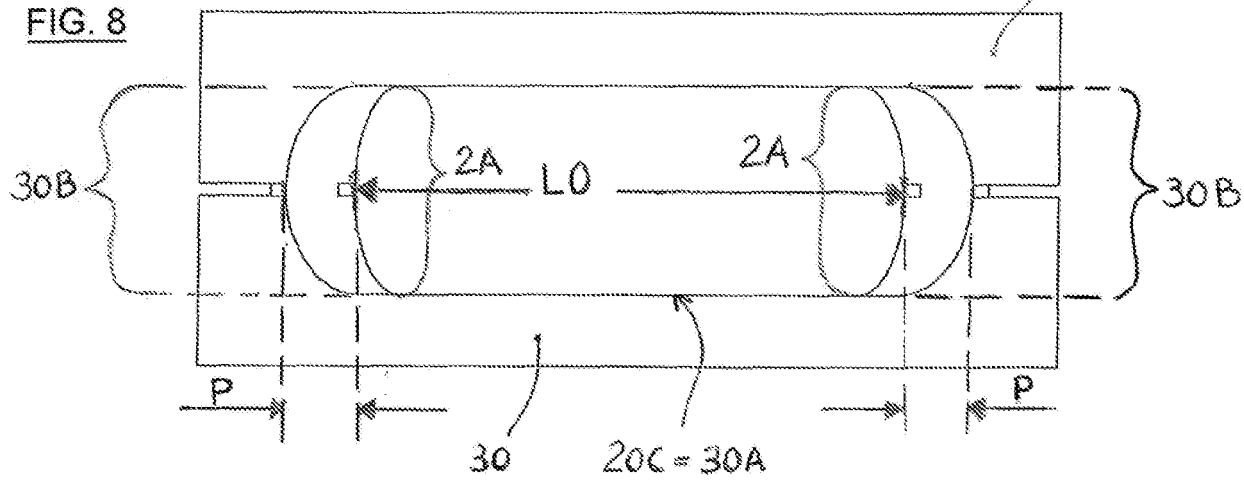


FIG. 9

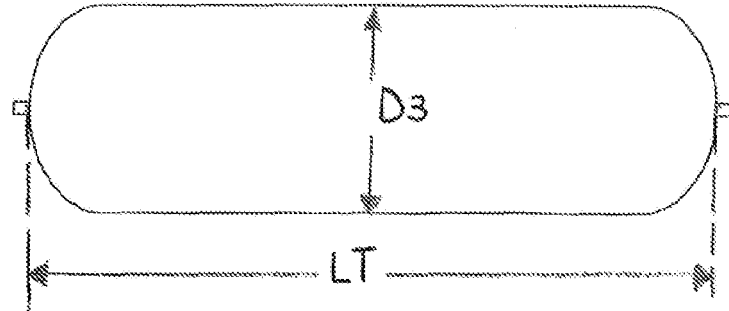


FIG. 10

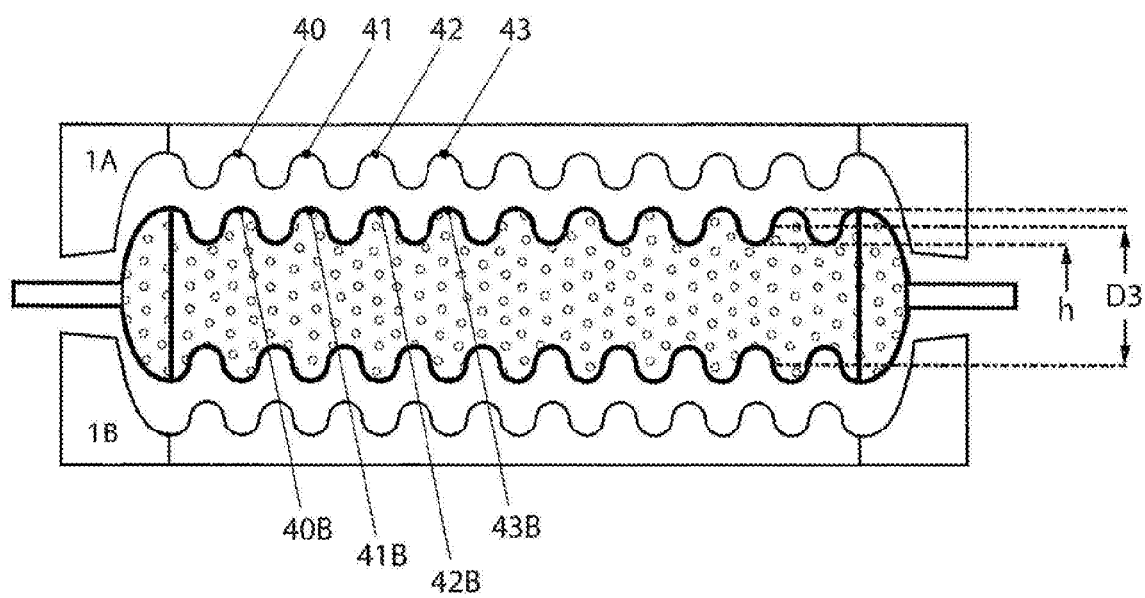


FIG. 11

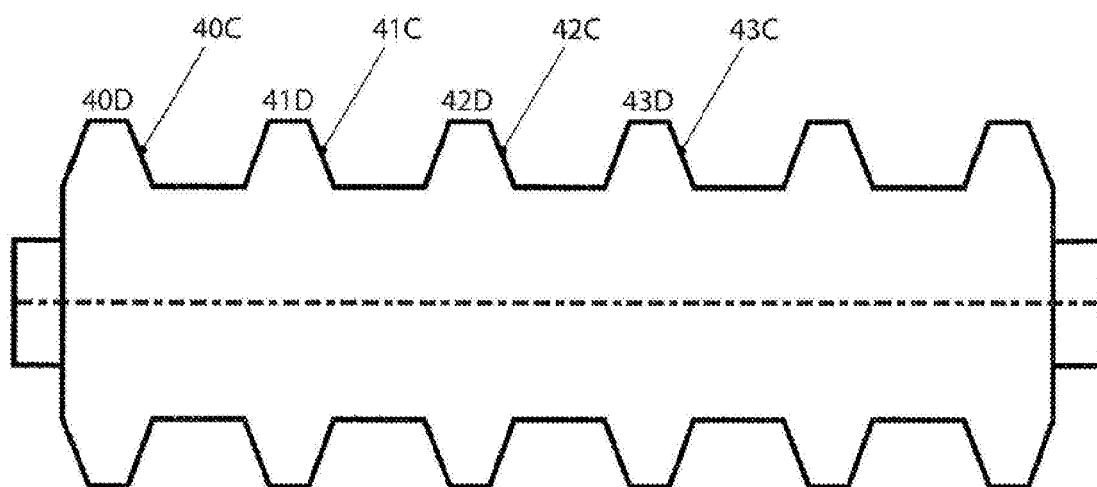


FIG. 12

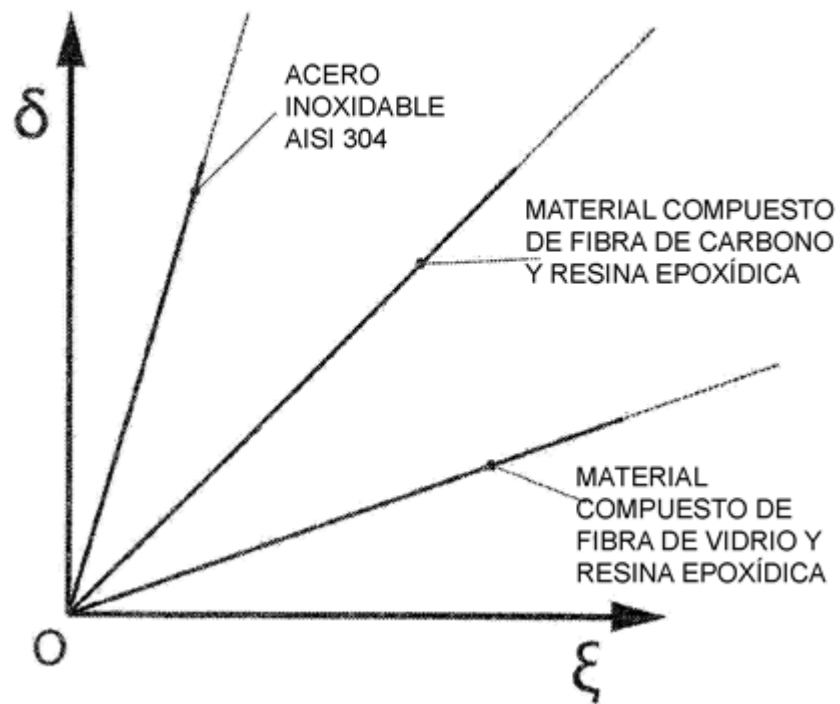
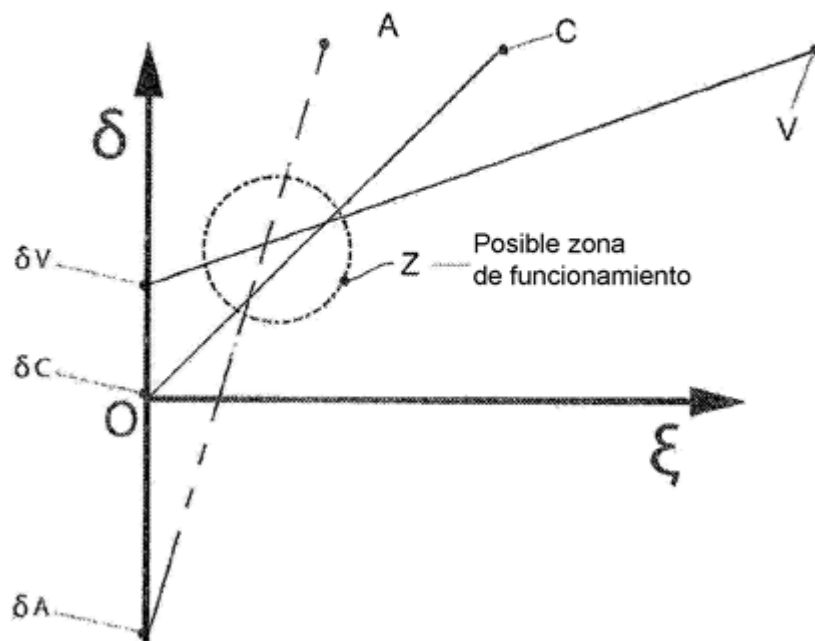


FIG. 13



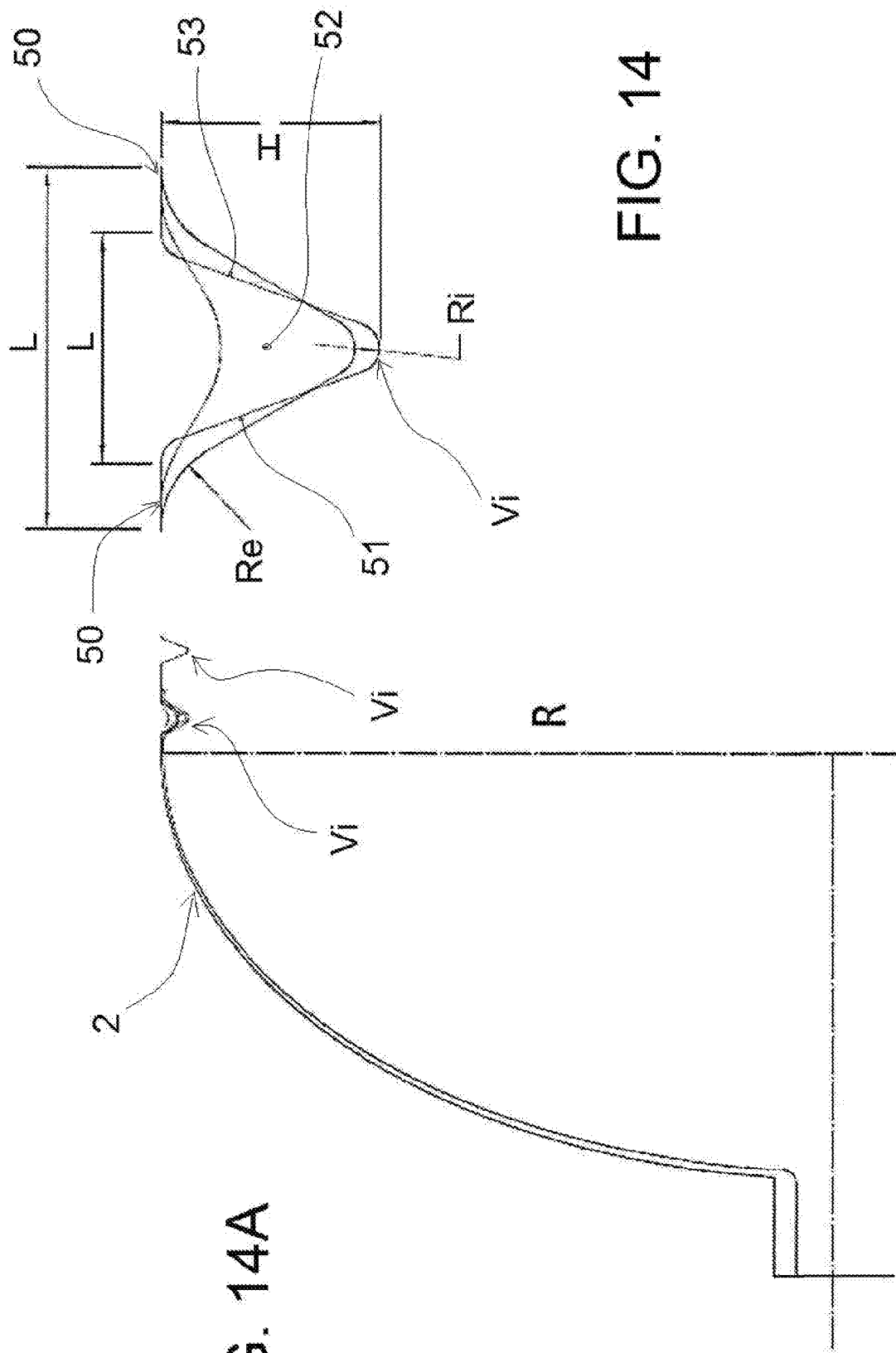


FIG. 14