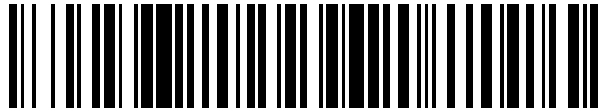


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 650 502**

21 Número de solicitud: 201630414

51 Int. Cl.:

**G06F 17/50** (2006.01)

**B21D 22/02** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

**05.04.2016**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**18.01.2018**

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE BURGOS (100.0%)  
C/ HOSPITAL DEL REY S/N  
09001 BURGOS ES**

72 Inventor/es:

**CURIEL SANZ, Enrique y  
CUESTA SEGURA, Isidoro Iván**

54 Título: **Procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío.**

57 Resumen:

Procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío, que comprende:

- ensayos de caracterización del material (410) del componente en condiciones de suministro;
- ensayos de embutición Marciniak (432) para extraer medidas de deformación y parámetros elasto-plásticos del material;
- simulación de ensayos de embutición (440), obteniendo un modelo estructural objetivo (464),
- simulaciones de embutición inversas (450), obteniendo un modelo fuente (466) con estimación de deformaciones y cambios de espesor en la embutición;
- mapeado (462) de los resultados de deformación del modelo fuente (466) sobre el modelo estructural objetivo (464);
- asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta (470);
- validación del modelo estructural (482) mediante simulación del ensayo de tracción uniaxial (484);
- fabricación mediante un proceso de estampación en frío del componente utilizando el modelo estructural validado.

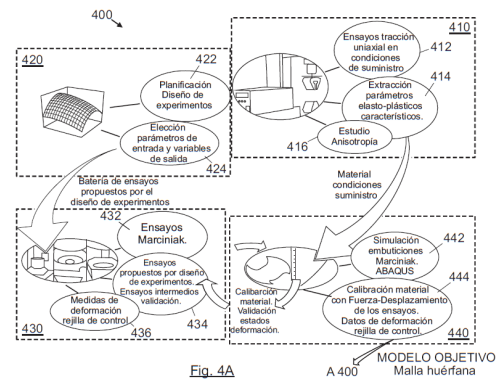


Fig. 4A

A 400

MODELO OBJETIVO  
Malla huérfana

**Procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío**

**DESCRIPCIÓN**

5 Campo de la invención

La presente invención se engloba dentro del campo de los procedimientos de desarrollo de componentes estampados en frío.

Antecedentes de la invención

10 La gran mayoría de los productos metálicos a nivel industrial se obtienen mediante conformado de chapas, los cuales son empleados en diversidad de aplicaciones, desde carrocerías de automóviles, electrodomésticos y aviones hasta envases de bebidas. Este proceso se caracteriza, principalmente, por ofrecer productos acabados de gran resistencia mecánica y peso reducido.

15 El proceso de estampación implica, en sí, deformaciones plásticas, por lo que el material de la chapa irá cambiando, no sólo de forma, sino también de propiedades mecánicas, sin afectar prácticamente al volumen de la chapa original. El objetivo final es alcanzar la forma deseada, sin que en el material se produzca una estricción localizada o la rotura.

20 La experiencia previa es fundamental en el desarrollo y puesta a punto de los procesos de conformado de chapa. Multitud de pruebas ensayo-error han de realizarse cuanto más nueva o desconocida sea la forma a embutir o el material a emplear. Esto supone, al enfrentarse a nuevos materiales o diseños, un elevado tiempo de puesta a punto del proceso, que se hace incompatible con los actuales requerimientos de tiempo de desarrollo de nuevos productos en automoción.

Desde hace ya unos años uno de los pasos eliminados en el diseño de componentes es la elaboración de prototipos de cada pieza al final de cada ciclo de diseño. Actualmente la aplicación de técnicas de simulación por ordenador, mediante el método de los elementos finitos, resulta de capital importancia para ayudar a la predicción de tanto la fidelidad de la pieza final fabricada respecto al diseño elegido como del comportamiento del material tras el proceso de fabricación.

35 La capacidad de las chapas de metal para ser conformadas en frío se avalúa habitualmente

empleando los Diagramas de Límite de Conformado o FLD (Forming Limit Diagram). La información que proporcionan está relacionada con las limitaciones que presentaría esa chapa de metal ante un proceso de conformado, en función de los diferentes estados de deformación unitaria principal que se presentan en la misma [1-9]. Los criterios de fallo representados en estos diagramas son la estricción localizada o rotura. Estos diagramas se realizan representando las mediciones de deformación que sufre una chapa tras someterla a un proceso de conformado. Son uno de los principales criterios comparativos, a nivel industrial, entre materiales, así como un criterio de fallo ampliamente utilizado, a nivel de simulaciones de estampación por elementos finitos.

10 Para definir el diseño y estructura final de un componente estampado existen dos etapas fundamentales: el proceso de fabricación para realizar la pieza y la simulación estructural para la superación de las exigencias del cuaderno de cargas establecido.

15 Hasta hace unos pocos años, los resultados ofrecidos por las herramientas de simulación, de cada etapa mencionada anteriormente, se empleaban exclusivamente dentro de su propio ámbito. Es decir, con los resultados de una simulación de inyección de una pieza plástica, se obtenían únicamente los parámetros necesarios para definir adecuadamente el proceso de inyección. De igual manera, los estados de carga simulados guían a los ingenieros hacia la configuración más robusta que sea capaz de soportar las exigencias mecánicas planteadas.

20 Sin embargo, es necesario que ambas etapas estén interconectadas. El reto surge al intentar interconectar dichas etapas de modo que se puedan emplear los datos proporcionados por una de las etapas como alimentación de otra. Hoy en día existen herramientas comerciales que permiten realizar el paso de trasladar ciertas características, resultado de las simulaciones de proceso, como datos de entrada para las simulaciones estructurales. Las características más comunes que se trasladan entre programas de simulación, desde simulación de proceso a simulación estructural, son los espesores y deformaciones plásticas tras el proceso de estampado.

25 Ya en el programa de simulación estructural, en cuanto a los espesores, su efecto es el de aumentar el número de colectores conteniendo zonas de espesores diferentes al nominal general, por lo que directamente la pieza ya no tendrá espesor uniforme. No hay que perder de vista que no existen las piezas metálicas estampadas en frío de espesor variable, y que

estas variaciones debidas al proceso son porcentualmente pequeñas comparadas con el espesor original.

5 Los programas de simulación estructural actuales reciben datos de entrada de deformaciones plásticas provenientes de la simulación de estampación y realizan una traslación de la curva del material en el eje horizontal, en la que se le proporcionan al programa los datos de tensión-deformación plástica verdaderas para cada material, pero sin tener en cuenta el grado de afectación que sufren las propiedades mecánicas en función del nivel de predeformación alcanzado durante la estampación del componente.

10 En numerosas ocasiones se detecta discrepancia entre ensayos estructurales físicos y sus simulaciones, para piezas metálicas que provienen de un proceso de conformado en frío. La variación de propiedades sufrida durante el conformado no se tiene en las simulaciones estructurales, lo que provoca la falta de correlación numérico- experimental en demasiadas  
15 ocasiones.

La presente invención presenta un procedimiento que mejora dichas correlaciones numérico-experimentales, al establecer una interconexión directa entre la simulación de proceso y la de estados de carga. Este paso directo de información supone un valor añadido ya que hasta el momento las simulaciones de procesos (que aportan las tensiones, deformaciones y demás parámetros geométricos que definen un estado inicial, a partir del cual se simulan los estados de carga requeridos) no son capaces de establecer la variación de propiedades mecánicas en función del nivel de predeformación alcanzado en el componente durante su estampación.

25 **Referencias bibliográficas**

[1] G. E. Totten, K. Funatani, L. Xie. Handbook of Metallurgical Process Design. CRC Press. (2004) 215-248.

30 [2] W.F. Hosford, R. Caddell: Metal forming: Mechanics and Metallurgy. Cambridge University Press. (2007) 245-275.

[3] S. Basak et al. Prediction of formability of bi-axial pre-strained dual phase steel sheets using stress-based forming limit diagram. Advances in Material Forming and Joining. 5th  
35 International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research

Conference. AIMTDR (2014) 167-182.

[4] K. Chang. Product Manufacturing and Cost Estimating using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series. Academic Press (2013) 133-189.

5

[5] T. Altan, A. E. Tekkaya. Sheet Metal Forming: Fundamentals. ASM International (2012).

[6] D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pöhlandt, A. E. Tekkaya. Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits. Springer Science & Business Media (2000).

10

[7] Z. Marciniak, J.L. Duncan, S.J. Hu. Mechanics of sheet metal forming. Butterworth-Heinemann (2002).

15

[8] Z. Marciniak and K. Kuczynski. Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metals. International Journal of Mechanics Sciences 9 (1967) 609-620.

[9] S.S. Hecker. Simple technique for determining forming limit curves. Sheet Metal Industries 52 (1975) 671-675.

20

[10] UNE-EN ISO 12004-2. Materiales metálicos. Chapas y bandas. Determinación de las curvas límite de conformado. Parte 2: determinación de las curvas límite en laboratorio.

[11] E. Mestres. Coupling simulations: A simple way to increase results accuracy (2012).

25

<http://insider.altairhyperworks.com/coupling-simulations/>

[12] R. Sturt, P. Richardson, A. Knight, T. Dutton. Residual effects of metal forming: their effect on crash results. Ove Arup & Partners International Ltd. United Kingdom. Paper No.

30

285. <http://www.nhtsa.gov/Research/>

- [13] W. WuRong, G. BiMeng, W. XiCheng, W. DaZhi, D. HanBin. An engineering approach to improve the accuracy of one-step simulation for vehicle forming-to-crashworthiness integrated evaluation. Science China-Technological Sciences. Springer (2012).
- 5 [14] L. Fu, X. Dong, P. Wang. Study on one-step simulation for the bending process of extruded profiles. The international journal of Advanced Manufacturing Technology 43 (2009) 1069–1080.
- [15] ASTM. E 8M Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials [Metric].  
10 Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 3.01.
- [16] S. Johansson, D. Sätterman. Simulation Driven Product Development. Master of Science. Thesis in the Master Degree. Program Supply Chain Management. Chalmers University of Technology (2012).
- 15 [17] A.I.Khuri, J.A. Cornell. Response surfaces. Design and analyses. Statistics: Textbooks and monographs 81. Marcel Dekker (1987).
- [18] R. O. Kuehl. Diseño de experimentos. International Thomson (2001).
- 20 [19] D. C. Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica (1991).
- [20] STATGRAPHICS Centurion XVII. Software para el análisis de datos con amplia gama  
25 de procedimientos estadísticos disponibles. <http://www.statgraphics.net/>
- [21] Altair Hyperworks ® “HF-5100: Result Mapping Using Process Manager”.  
[http://www.altairhyperworks.com/\(S\(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd\)\)/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result\\_mapping\\_using\\_process\\_manager\\_hf\\_5100.htm](http://www.altairhyperworks.com/(S(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd))/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm)
- 30 [22] Altair Hyperworks ® HyperMesh.  
[http://www.altairhyperworks.com/HWTemp3Product.aspx?product\\_id=7&item\\_name=New%20Features](http://www.altairhyperworks.com/HWTemp3Product.aspx?product_id=7&item_name=New%20Features).
- 35 [23] Altair Hyperworks ® “Radioss One-step. HF-1000: One step Stamping Simulation”.  
[http://www.altairhyperworks.com/\(S\(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd\)\)/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result\\_mapping\\_using\\_process\\_manager\\_hf\\_5100.htm](http://www.altairhyperworks.com/(S(3fu2zyrlbyi03xcofiue25jd))/hwhelp/Altair/hw13.0/help/mfs/mfs.htm?result_mapping_using_process_manager_hf_5100.htm)

Descripción de la invención

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío que establece una interconexión entre la simulación de proceso y la simulación estructural durante el desarrollo de los componentes estampados, de modo que las propiedades mecánicas del material se modifiquen en función del nivel de predeformación alcanzado en cada zona del componente.

10 El procedimiento controla y define la manera óptima de transferir los resultados de la deformación, producida durante la simulación del proceso de estampado, hacia los programas de simulación estructural para poder así tenerla en cuenta al realizar las simulaciones de los casos de carga a que esté sometido ese componente estampado. Se define también una metodología de trabajo, aplicable a nivel industrial, con la que  
15 enfrentarse a la estimación mediante simulación de la rigidez estructural de componentes estampados.

El procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío comprende las siguientes etapas:

20 - Realizar ensayos de caracterización del material del componente en condiciones de suministro, incluyendo ensayos de tracción uniaxial para extraer parámetros elasto-plásticos del material. Los ensayos de caracterización del material también pueden incluir un estudio de anisotropía para caracterizar el material en diferentes orientaciones.

- Diseño de experimentos basado en superficies de respuesta.

25 - Realizar ensayos de embutibilidad en base a los experimentos propuestos en la etapa de diseño de experimentos, incluyendo ensayos de embutición Marciniak para extraer medidas de deformación y parámetros elasto-plásticos del material de cada ensayo Marciniak. La realización de ensayos de embutibilidad puede comprender una etapa de medida del estado de deformación mediante rejilla de control para la determinación de las  
30 deformaciones menor y mayor.

- Simulación de ensayos de embutición, incluyendo simulaciones de embutición Marciniak para obtener un modelo estructural objetivo. La simulación de ensayos de embutición puede comprender una etapa de calibración del material a partir de uno de los ensayos de tracción uniaxial como valor de referencia.

35 - Simulaciones de embutición inversas para obtener un modelo fuente con una

estimación de los valores de deformación y cambios de espesor que tendrán lugar en el proceso de embutición.

5 - Transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación estructural, que comprende un mapeado de los resultados de deformación del modelo fuente sobre el modelo estructural objetivo.

- Asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta. Esta etapa comprende preferentemente un script de creación de materiales y un script de asignación de materiales por rangos de deformación.

10 - Validación del modelo estructural mediante una simulación del ensayo de tracción uniaxial.

- Fabricación mediante un proceso de estampación en frío del componente utilizando el modelo estructural validado.

15 La etapa de diseño de experimentos comprende preferentemente una elección de parámetros de entrada y variables de salida, incluyendo parámetros de ensayo y parámetros de probeta. Los parámetros de ensayo pueden ser, entre otros, el diámetro del punzón, el radio de acuerdo punzón, el diámetro de la matriz inferior, el radio de acuerdo matriz inferior, la velocidad de ensayo, y/o la profundidad de embutición. Los parámetros de probeta pueden ser el material, el espesor, y/o la anchura de probeta.

20 La principal aplicación industrial del procedimiento desarrollado radica en la mejora de las correlaciones numérico-experimentales de componentes estampados al permitir tener en cuenta el grado de afectación de las propiedades mecánicas del material en función del nivel de predeformación alcanzado durante el proceso de estampado del mismo.

25 En una posible realización el procedimiento de la presente invención comprende las siguientes etapas:

30 • Ensayar probetas de tracción uniaxial en dirección longitudinal, transversal y a 45 grados extraídas de la placa de material en condiciones de suministro. Extraer la curva tensión-deformación, los parámetros elasto-plásticos y los coeficientes de Lankford.

35 • Realizar simulación inversa de la geometría objetivo para definir los rangos de deformación de interés, sobre todo para definir el límite de deformación superior, estando por debajo de la curva de límite de conformado. Introducir las propiedades del material obtenidas del paso anterior. Reproducir lo mejor posible las condiciones de pisado y rozamiento entre piezas.



- Plantear un diseño de experimentos para definir las profundidades y geometrías Marciniak que permitan cubrir el mayor rango de deformación necesario.

- Ensayar las diferentes geometrías Marciniak y profundidades definidas por el diseño de experimentos. Extraer probetas de tracción de cada probeta Marciniak.

5           • Obtener las superficies de respuesta para cada parámetro de material analizado.

- Decidir el número de materiales para cubrir todo el rango de deformación de la pieza embutida. Cuantos más materiales, más aproximado será el estado de deformación empleado en la simulación estructural, pero más tiempo lleva la asignación de materiales por parte del script.

10           • Modificar los scripts en función de los resultados del diseño de experimentos, de los rangos de deformación y del número de materiales escogido.

- Realizar la malla de la pieza objetivo para su simulación estructural y mapear sobre ella los resultados de deformación provenientes de la simulación inversa. Asegurar que se obtiene la salida de los dos ficheros que contienen en la primera columna el número del elemento de la malla estructural y en la segunda, el valor de deformación principal correspondiente a ese elemento tras el mapeado.

15           • Lanzar los scripts desde el programa de simulación estructural, con la malla estructural ya generada, para que estos creen los materiales necesarios y realicen la asignación de las diferentes secciones según el estado de deformación de cada elemento.

20           • A partir de aquí, cualquier caso de carga estático que se simule con este modelo, tendrá en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre el cambio de las propiedades del material.

#### Breve descripción de los dibujos

25           A continuación se pasa a describir de manera muy breve una serie de dibujos que ayudan a comprender mejor la invención y que se relacionan expresamente con una realización de dicha invención que se presenta como un ejemplo no limitativo de ésta.

30           La Figura 1A muestra, de acuerdo al estado del arte, un diagrama de las etapas del diseño de componentes en el sector de la automoción. La Figura 1B representa un diagrama del diseño de componentes en el sector de la automoción de acuerdo a la presente invención.

Las Figuras 2A y 2B muestran una traslación de la curva del material en el eje horizontal realizada según el estado del arte.

35

La Figura 3 muestra un diagrama FLD en el que se representan las diferentes regiones en función del estado de deformación del material.

5 Las Figuras 4A y 4B muestran un diagrama con los distintos pasos del procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío de la presente invención.

La Figura 5 representa a modo de ejemplo distintos parámetros elasto-plásticos del material obtenidos a partir de un ensayo de tracción uniaxial.

10

La Figura 6 muestra un detalle de la zona de extracción de probetas uni-axiales después de realizar la embutición.

La Figura 7 muestra un diagrama FLD con la mayoría de experimentos en la zona de  $\epsilon_{II} < 0$ .

15

La Figura 8 muestra un ejemplo de probeta embutida con el mapa de distribución de  $\epsilon_{II}$  y la fuerza de reacción del punzón.

20 La Figura 9 muestra un ejemplo de mapeado de resultados desde simulaciones de proceso a modelos estructurales.

#### Descripción detallada de la invención

La **Figura 1A** muestra de manera esquemática un diagrama con las etapas del diseño de componentes 100 en el sector de la automoción de acuerdo al estado del arte convencional. 25 El diseño de un componente 100 se trata de un proceso iterativo donde el paso de los resultados de las simulaciones estructurales (simulaciones de estados de carga 120) a las simulaciones de proceso de fabricación 110 se hace a través de la modificación del diseño del componente, propuestas de rediseño 130, para reiniciar el proceso con el nuevo rediseño planteado. De este modo, no existe una interconexión directa entre la simulación 30 de proceso 110 y la simulación de estados de carga 120. Una vez fabricada la pieza, se realiza una validación de los resultados de cada simulación.

La **Figura 1B** representa un diagrama del diseño de componentes en el sector de la automoción de acuerdo a la presente invención, donde los resultados de la simulación de

proceso de fabricación (e.g. proceso de conformado en frío) configuran el estado tensional de partida para la simulación estructural. Esta transferencia 150 de los resultados de la simulación del proceso de fabricación al modelo de simulación estructural supone un valor añadido ya que las simulaciones de procesos aportan las tensiones, deformaciones y demás  
5 parámetros geométricos que definen un estado inicial, a partir del cual, se simulan los estados de carga requeridos.

En la actualidad existen programas comerciales de elementos finitos que realizan una traslación de la curva 200 del material en el eje horizontal, como se muestra en las **Figuras**  
10 **2A** y **2B**, en la que se le proporcionan al programa los datos de tensión-deformación plástica verdaderas para cada material. En la Figura 2A se muestra la ley constitutiva para acero laminado (relación tensión-deformación plástica) y en la Figura 2B la ley constitutiva para acero laminado con X% de deformación plástica inicial (esto es, la Figura 2B es una traslación en el eje horizontal de la curva del material de la Figura 2A).

15 Sin embargo, estos programas comerciales no tienen en cuenta el grado de afectación que sufren las propiedades mecánicas en función del nivel de predeformación alcanzado durante la estampación del componente. La presente invención, sin embargo, transfiere de manera óptima los resultados de la simulación de estampado a los datos de entrada necesarios para  
20 la simulación estructural, teniendo en cuenta los resultados del proceso de conformado en frío, para obtener un nivel de correlación adecuado entre simulaciones y ensayos.

La capacidad de las chapas de metal para ser conformadas en frío se avalúa habitualmente empleando diagramas FLD (Diagrama de Límite de Conformado). La **Figura 3** ilustra un  
25 diagrama FLD en el que se muestran las diferentes regiones en función del estado de deformación alcanzado. La curva 300 del diagrama FLD marca el límite de seguridad por debajo del cual las deformaciones no generan el fallo del material. Los pares de combinaciones deformación mayor-deformación menor que generen puntos en el FLD por debajo de la curva límite 300 indican que el material no ha llegado al límite de deformación.  
30 Por otro lado, si el punto se sitúa por encima de dicha curva, es muy probable que sí se produzca el fallo del material. En el procedimiento de la presente invención para la obtención directa del FLD para la aleación ligera seleccionada se empleará una de las técnicas habituales para su obtención, el ensayo Marciniak [7-10], para obtener diferentes estados de deformación en chapas embutidas a diferentes profundidades.

35

El procedimiento de la presente invención tiene por objeto definir los datos de entrada necesarios para que en la simulación estructural de un componente metálico estampado se tenga en cuenta la afectación del proceso de estampado sobre las propiedades elasto-plásticas y el espesor de la pieza. El procedimiento define además la manera más adecuada para transferir esos datos desde la simulación de estampación hasta el modelo estructural.

Las **Figuras 4A** y **4B** muestran un diagrama con los pasos del procedimiento 400 de la presente invención. Dicho diagrama representa de manera más detallada el esquema de la Figura 1B, especificando las tareas que se llevan a cabo en cada una de las etapas que constituyen el proceso definitivo.

En un primer paso se realizan ensayos de caracterización del material 410 en condiciones de suministro. Se definen así los parámetros elasto-plásticos del material fundamentales que, en paralelo, sirvan para planificar el diseño de experimentos, mediante superficies de respuesta, las cuales se definen según un modelo cuadrático de segundo orden dependiente de una serie de parámetros variables y que permiten predecir el valor real de la respuesta para cualquier combinación de los parámetros variables. En la siguiente etapa, se llevan a cabo ensayos de embutibilidad 430, de acuerdo a los experimentos propuestos en una etapa de diseño de experimentos 420, extrayéndose las medidas de deformación de cada ensayo, así como los parámetros elasto-plásticos del material tras cada uno de los ensayos Marciniak. Esto permite obtener la variación de cada uno de estos parámetros en función del estado de deformación alcanzado durante la embutición. Se realizan simulaciones de los ensayos de embutición 440 (por ejemplo, con el programa Abaqus®) y se validan los modelos de simulación empleando los resultados de los ensayos físicos.

Para ver el grado de exactitud de las simulaciones inversas respecto a las hechas con Abaqus®, ya que su preparación y tiempo de cálculo es menor, se emplea el programa Hyperform®, validándose sus resultados. Los resultados de estas simulaciones inversas se mapean sobre los modelos estructurales y se asignan, mediante scripts programados ad-hoc, los materiales definidos en el diseño de experimentos, según el estado de deformación de cada elemento. Para finalizar, se simula una probeta uniaxial con un estado de deformación asignado por el script y validado frente a su ensayo experimental correspondiente.

El procedimiento 400 comprende las siguientes etapas, las cuales se describen a

continuación en detalle:

- Ensayos de caracterización del material 410 para la obtención de parámetros del material.
- Ensayos de embutibilidad 430.
- 5 - Diseño de experimentos 420.
- Validación del diseño de experimentos.
- Simulaciones de embutición 440.
- Simulaciones de embutición inversas 450.
- Transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación estructural
- 10 460.
- Asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta 470. Programación de scripts.
- Validación de resultados 480. Simulación ensayo tracción uniaxial.
- 15 Con respecto a los ensayos de caracterización del material 410 para la obtención de parámetros del material, dado que los datos de entrada admitidos por el programa de simulación estructural se introducen en forma de curva tensión-deformación plástica verdaderas proveniente del ensayo normalizado de tracción uniaxial [15], es necesario decidir qué parámetros extraídos de este ensayo son los necesarios para definir ese
- 20 comportamiento. Los parámetros más habituales son el módulo de elasticidad del material  $E$ , el límite elástico convencional  $\sigma_{0.2}$ , la tensión última  $\sigma_{UTS}$  y la máxima elongación a rotura  $\epsilon_{rot}$ , además del coeficiente de endurecimiento por deformación  $n$  y del coeficiente de dureza  $K$  de la ley de Hollomon. La **Figura 5** representa a modo de ejemplo distintos parámetros elasto-plásticos del material obtenidos a partir de un ensayo de tracción uniaxial.
- 25 La afectación del proceso de conformado sobre el comportamiento del material está directamente relacionada con el nivel de deformación alcanzado durante este proceso, por lo que hay que relacionar estos estados de deformación, en forma de deformación principal mayor  $\epsilon_I$  y deformación principal menor  $\epsilon_{II}$  provenientes del ensayo de embutibilidad, con
- 30 los parámetros elasto-plásticos del material 414 que se seleccionen finalmente. Para poder conocer el comportamiento del material y decidir las variables elasto-plásticas a utilizar provenientes de este ensayo, tanto en condiciones de suministro del material como tras ser sometido a diferentes niveles de deformación, es necesario realizar ensayos de tracción uniaxial 412 del material “virgen” así como de zonas con niveles de deformación conocidos y

que permitan la extracción de probetas, de las muestras ya embutidas, para este ensayo de tracción uniaxial 412. También se puede llevar a cabo un estudio de anisotropía 416 del material con el objetivo de caracterizar el material en las diferentes orientaciones y poder así simular correctamente su comportamiento mecánico.

5

Con respecto a los ensayos de embutibilidad 430, al ser necesario disponer del comportamiento elasto-plástico del material, tras haberse sometido a un proceso de embutición, es necesario disponer de muestras de material con las siguientes condiciones:

- Haber sido embutido bajo condiciones normalizadas.
- 10 • Que esa embutición ofrezca un valor conocido y controlado del estado de deformación ( $\epsilon_I, \epsilon_{II}$ ).
- Que la muestra embutida permita la obtención de probetas de tracción uniaxial. La **Figura 6** muestra un detalle de la zona de extracción de probetas uni-axiales tras embutir.

15

Para cumplir estas condiciones se emplea el ensayo de embutición Marciniak 432 de acuerdo a la norma UNE-EN\_ISO\_12004-2 [10], teniendo en cuenta los ensayos propuestos por el diseño de experimentos 434. En este sentido, se han de definir una serie de parámetros, tanto geométricos de utillaje (radios de acuerdo y diámetros de punzón y matriz, fuerza del pisador, velocidad de ensayo) como de las muestras a ensayar (material, espesor, dimensiones de las probetas). Estos parámetros, al igual que los escogidos para definir el comportamiento elasto-plástico, se utilizarán también como entrada del diseño de experimentos 420 a planificar, tal y como se explicará más adelante. Para cada uno de los ensayos de embutición propuestos se dispone, mediante unos medios de medida de deformaciones, de una medida del estado de deformación 436 generado en la zona de interés (zona plana de máxima embutición de definición de la rejilla de control) de las probetas Marciniak. El método de la rejilla de control para la determinación de las deformaciones menor y mayor, es suficientemente exacto dado que la zona central de las probetas Marciniak presenta estados prácticamente uniformes de deformación en todo el área de la rejilla.

30

La etapa de diseño de experimentos 420 basado en superficies de respuesta comprende una planificación de diseño de experimentos 422 y una elección de parámetros de entrada y variables de salida 424. Antes de proceder a la determinación de estas superficies de respuesta es necesario apuntar una primera reflexión sobre los parámetros que influyen en

35

su valor. Dichos parámetros se pueden englobar en dos grandes grupos: parámetros de ensayo y parámetros de probeta. Todos estos parámetros aparecen recogidos en la siguiente tabla, que muestra los parámetros influyentes en el valor de las propiedades elasto-plásticas:

5

PARÁMETROS DE ENSAYO	PARÁMETROS DE PROBETA
Diámetro del punzón	Material
Radio de acuerdo punzón	Espesor
Diámetro de la matriz inferior	Anchura de probeta
Radio de acuerdo matriz inferior	
Velocidad de ensayo	
Profundidad de embutición	

10 Resulta evidente que es extremadamente complicado obtener una superficie de respuesta que englobe la variación de todos estos parámetros, por lo que es necesario fijar algunos de ellos. Siguiendo un criterio de economía de costes, resulta justificado fijar los parámetros de ensayo dependientes del utillaje que se han fijado según la norma UNE-EN\_ISO\_12004-2 [10], así como la velocidad de ensayo, el material y el espesor de la probeta. La profundidad de embutición es una dimensión claramente variable porque su valor constituye uno de los parámetros fundamentales del proceso de embutición de las probetas Marciniak para lograr diferentes rangos en la deformación principal máxima ( $\epsilon_I$ ). En este sentido, en una realización particular se varía la profundidad de embutición (por ejemplo, entre 6mm y 18mm). El otro parámetro fundamental es la anchura de la probeta Marciniak ya que su variación hace variar el ratio  $\beta = \epsilon_{II}/\epsilon_I$  desde el valor de 1 de la probeta biaxial (100mm de anchura) hasta el valor de -0.5 de la probeta uniaxial (20mm). Con el objetivo de poder implementar los resultados obtenidos en la metodología desarrollada se ha optado por emplear como parámetros variables  $\epsilon_I$  y  $\beta$ , los cuales pueden ser relacionados directamente con la profundidad de embutición y con la anchura de probeta, respectivamente. La siguiente tabla recoge tanto los intervalos de los parámetros variables como los parámetros fijos con los que se ha trabajado para la obtención de las superficies de respuesta de las propiedades elasto-plásticas:

15

20

25

PARÁMETROS FIJOS	
Diámetro del punzón ( <i>mm</i> )	90
Radio de acuerdo punzón ( <i>mm</i> )	9
Diámetro matriz inferior ( <i>mm</i> )	108
Radio acuerdo matriz inferior ( <i>mm</i> )	9
Velocidad de ensayo ( <i>mm/s</i> )	1
Material	AW 5083 O/H111
Espesor ( <i>mm</i> )	1.5
PARÁMETROS VARIABLES	
$\beta = \varepsilon_{II} / \varepsilon_I$	[- 0.5,1]
Deformación principal mayor $\varepsilon_I$	[0.01,0.17]

La relación existente entre los parámetros variables y el valor de las diferentes propiedades elasto-plásticas se pueden expresar como una función  $f$ , donde  $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$  se postula como modelo cuadrático de la forma expresada en la ecuación (1), con  $\beta^*$  y  $\varepsilon_I^*$  como las variables codificadas de  $\beta$  y  $\varepsilon_I$  respectivamente. La codificación de los valores reales de los parámetros es necesaria para que todos ellos varíen en el mismo intervalo, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función  $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ . Para cualquier valor real  $X_i$  de los parámetros variables dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (2), obteniendo el valor codificado  $x_i$  correspondiente, donde  $X_{iNINF}$  es el valor real del nivel más bajo del factor  $i$ ,  $X_{iNSUP}$  es el valor real del nivel más alto del factor  $i$ , y  $\tilde{X}_i$  es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor  $i$ .

$$f(\beta^*, \varepsilon_I^*) = b_0 + b_1\beta^* + b_2\varepsilon_I^* + b_{11}\beta^{*2} + b_{12}\beta^*\varepsilon_I^* + b_{22}\varepsilon_I^{*2} \quad (1)$$

$$x_i = \frac{2 \cdot (X_i - \tilde{X}_i)}{X_{iNSUP} - X_{iNINF}} \quad i = \beta^*, \varepsilon_I^* \quad (2)$$



La determinación de los coeficientes de la función  $f(\beta^*, \epsilon_I^*)$  para cada propiedad elasto-plástica se realiza a través de un diseño de experimentos cúbico [17-19], utilizando por ejemplo el software STATGRAPHICS Centurion [20].

5

Las principales características de este diseño son:

- Utilización de dos factores, los cuáles son los parámetros  $\beta^*$  y  $\epsilon_I^*$ .
- Dominio cúbico.
- Codificación de los intervalos de valores de los dos factores recogidos en la tabla anterior, para que varíen entre [-1,1], según la ecuación (2).
- Matriz de experimentos con tres niveles, tanto para el factor  $\beta$  como para el factor  $\epsilon_I$ , en función de la anchura de probeta y de la profundidad de embutición respectivamente (mostrados en la tabla más abajo).
- Sin repeticiones en el punto central del dominio.
- Utilización de un modelo cuadrático, definido por la ecuación (1), para el ajuste de las superficies de respuesta.

10

15

20

La siguiente tabla recoge tanto la matriz de experimentos con las variables codificadas, como la matriz del plan de experimentación con los valores de los factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de las funciones  $f(\beta^*, \epsilon_I^*)$ :

Nº Exp.	MATRIZ DE EXPERIMENTOS (Variables codificadas)		PLAN DE EXPERIMENTACIÓN (Valores reales)			
	$\beta^*$	$\epsilon_I^*$	$\beta$	$\epsilon_I$	Anchura de probeta (mm)	Profundidad de embutición (mm)
1	-1.00	-0.98	-0.50	0.012	20	6
2	-0.79	-0.95	-0.34	0.014	80	6
3	-1.00	-0.33	-0.50	0.064	20	12
4	-0.79	-0.58	-0.34	0.044	80	12

5	-1.00	1.00	-0.50	0.17	20	18
6	-0.79	0.19	-0.34	0.105	80	18
7	1.00	-0.56	1.00	0.045	100	12
8	1.00	0.04	1.00	0.093	100	17
9	1.00	0.84	1.00	0.157	100	21

Hay que hacer notar que los datos correspondientes a  $\beta$ ,  $\varepsilon_I$ ,  $\beta^*$  y  $\varepsilon_I^*$  se obtienen tras la realización de cada uno de los experimentos.

5 Cada uno de los experimentos del plan de experimentación se realiza en los ensayos de embutibilidad 430 a través de la embutición de una probeta Marciniak y la posterior extracción y ensayo de una probeta de tracción, con la única salvedad que los valores de  $\beta$  y  $\varepsilon_I$  son los recogidos en la tabla anterior, obteniendo como resultado final del experimento la respuesta de las diferentes propiedades elasto-plásticas ( $E$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\sigma_{UTS}$ ,  $\varepsilon_{rot}$ ,  $K$  y  $n$ ). Una vez obtenidos estas propiedades, con la ayuda de una aplicación de diseño de experimentos cúbico (e.g. STATGRAPHICS Centurion), es posible determinar los coeficientes de las funciones  $f(\beta^*, \varepsilon_I^*)$ . En la Figura 5 mostrada anteriormente aparece una curva tensión-deformación ingenieril típica donde se han indicado las propiedades elasto-plásticas extraídas en cada experimentación.

15 La definición de la anchura de probeta se realiza basándose en estudios previos [3,5] que muestran que, en cuanto se reduce la anchura restante de las probetas de “hueso de perro”, descritas en la UNE-EN\_ISO\_12004-2 [10], se pasa rápidamente del estado biaxial puro a estados entre la deformación plana, con  $\varepsilon_{II}=0$ , y la tensión uniaxial, con  $\varepsilon_{II}<0$ . La **Figura 7** muestra un diagrama FLD con la mayoría de experimentos en la zona de  $\varepsilon_{II}<0$  [5]). Esto hace que se definan dos de las tres probetas en estados de  $\varepsilon_{II}<0$ .

A continuación se realiza la validación del diseño de experimentos. Con objeto de validar el diseño de experimentos realizado se llevan a cabo ensayos de embutición de tamaños intermedios de probeta de “hueso de perro” de los que se extraen tanto los valores de  $\beta$  y  $\varepsilon_I$ ,

mediante la medida de la deformación sufrida durante la embutición, como los parámetros elasto-plásticos mediante los ensayos de probetas de tracción uniaxial extraídas de las muestras embutidas.

- 5 Al ser los parámetros de entrada del diseño  $\beta$  y  $\varepsilon_T$ , se miden estos parámetros de las probetas embutidas y, mediante las superficies de respuesta obtenidas del diseño de experimentos, se estiman los parámetros elasto-plásticos predichos por las superficies de respuesta. Estos últimos se comparan con los mismos parámetros elasto-plásticos reales, extraídos del ensayo de tracción uniaxial de las muestras deformadas. En este punto, si la
- 10 correlación es satisfactoria, se pueden dar por buenas las superficies de respuesta para la predicción de parámetros elasto-plásticos en función de los parámetros  $\beta$  y  $\varepsilon_T$ , que definen cualquier estado de deformación entre los rangos establecidos durante la embutición.

Con el objetivo de validar los modelos empleados en las simulaciones de elementos finitos, se simulan los ensayos de embutición experimentales en una etapa de simulaciones de embutición 440. El primer paso para resolver cualquier problema por el método de elementos finitos es discretizar su geometría utilizando un conjunto de elementos. Cada elemento representa una porción discreta del conjunto físico. Los elementos finitos están unidos mediante nodos compartidos. Al conjunto final de nodos y elementos finitos se le

20 denomina malla. El número de elementos por unidad de longitud, área o volumen en una malla se llama densidad de malla. En un análisis de tensiones, el desplazamiento de los nodos es la variable fundamental que se calcula en el método de elementos finitos. Una vez se conocen todos los desplazamientos de los nodos, las tensiones y las deformaciones en cada elemento se pueden determinar fácilmente.

25 Para calcular los desplazamientos, se puede resolver el problema de dos maneras diferentes: de forma implícita y de forma explícita. La diferencia entre las dos formas de calcular es que, en el caso del método implícito, se necesita resolver simultáneamente el sistema de ecuaciones de los desplazamientos y la matriz de rigidez, mientras que en el

30 método explícito, la solución se avanza cinemáticamente de un incremento al siguiente [16].

En una realización preferida del presente procedimiento 400 se selecciona, como parámetro principal de comparación entre ensayo y simulación, la fuerza de reacción del punzón durante el avance de la embutición, obteniéndose una gráfica fuerza-desplazamiento del

punzón, para ambas situaciones, que es la que sirve de contraste. La **Figura 8** muestra un ejemplo de probeta embutida mediante ABAQUS®, con el mapa de distribución de  $\epsilon_{II}$  y la fuerza de reacción del punzón. Como parámetro de comparación adicional se puede emplear el estado de deformación generado en la rejilla de control, tanto de los ensayos  
5 como de sus simulaciones equivalentes. Otros parámetros de comparación diferentes pueden ser empleados.

Una vez realizadas las simulaciones de embutición Marciniak 442, utilizándose uno de los experimentos como valor de referencia se realiza la calibración 444 del modelo y del rozamiento entre punzón y probeta hasta conseguir la correlación de los parámetros de control expuestos anteriormente. Una vez fijados, se usan esos mismos parámetros de material y rozamiento para la simulación del resto de modelos numéricos de los experimentos propuestos. El resultado del proceso de simulaciones de embutición 440 es un modelo estructural objetivo 464 que será usado, en una etapa posterior, para el mapeado de  
10 resultados 462 desde simulaciones de proceso a modelos estructurales.

Con respecto a la etapa de simulaciones de embutición inversas 450, se dispone de un tipo de herramientas de simulación de procesos de estampación-embutición 452 denominados *inverse* o *one-step* (por ejemplo el módulo de simulación inversa Hyperform One-Step®  
20 [23]). Su utilidad radica en que son capaces de dar un valor aproximado de la embutibilidad del componente estudiado, así como una estimación de los valores de deformación y cambios de espesor que tendrán lugar durante el proceso de embutición, de manera relativamente rápida y muy útil en las primeras etapas de desarrollo de un producto estampado.

25 Los modelos empleados suponen un ahorro tanto en tiempo de preproceso como de simulación y postproceso de resultados. Por otro lado, la imposibilidad de capturar los efectos dependientes del camino de estampado, al asumir un camino lineal entre las geometrías inicial y final, puede causar que se infravaloren las deformaciones. Cuantos más  
30 parámetros del proceso se puedan incluir en la simulación de one-step, más exactos serán los resultados obtenidos [12,13,14].

Los resultados de la simulación one-step se pueden emplear para predecir las propiedades elasto-plásticas en función de la deformación ocurrida en el proceso. A continuación, se  
35 validan los resultados 454 ofrecidos por la simulación inversa de la embutición Marciniak

comparándolos con la simulación de embutición en sí. De esta manera, se obtiene una reducción en los tiempos de cálculo, optimizándose el proceso y permitiendo usar los resultados de deformación de las simulaciones de estampación inversa como dato de entrada para unos scripts de generación de materiales. El resultado del proceso simulaciones de embutición inversas 450 es un modelo fuente 466 que se empleará posteriormente en el mapeado de resultados 462 desde simulaciones de proceso a modelos estructurales.

Posteriormente se realiza la transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación estructural 460. Llegados a este punto, con las simulaciones de embutición validadas usando los ensayos Marciniak del diseño de experimentos, así como las probetas intermedias embutidas para validar este mismo diseño, se dispone de unos resultados de estado de deformación y espesores finales. Se efectúa el mapeado de resultados 462 entre diferentes programas de simulación mediante una herramienta software (e.g. Result Mapper [11,21]), la cual se emplea para comunicar los resultados del estado de deformación, obtenido en las simulaciones de embutición, al correspondiente modelo de cálculo estructural. La **Figura 9** muestra un ejemplo de mapeado de resultados 462 desde simulaciones de proceso a modelos estructurales, donde la probeta embutida de la izquierda representa el modelo estructural objetivo 464, la probeta superior derecha refleja el modelo fuente 466 con los resultados del estado de deformación obtenido en las simulaciones de embutición y la probeta inferior derecha representa el mapeado de los resultados de deformación sobre el modelo estructural.

El proceso de trabajo con el programa Result Mapper empieza definiendo el modelo de destino, previamente importado en el programa HypeMesh [22]. Se cargan luego los resultados provenientes del programa de simulación de embutición indicando una zona de referencia en cada modelo, para que el programa de mapeado pueda identificar que se trata de la misma pieza, aun cuando ambos modelos tengan diferente malla de elementos finitos. Como salida adicional, el programa de mapeado permite escribir un fichero de texto con la numeración de los elementos del modelo receptor y su valor correspondiente del parámetro mapeado, que en este caso han sido  $\epsilon_I$  y  $\epsilon_{III}$ .

A continuación se realiza la asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta 470. En este momento ya se dispone del estado de deformación

- que hay en cada elemento de la probeta embutida, se dispone de los valores de  $\varepsilon_I$  y  $\varepsilon_{II}$ , en dos ficheros de salida 468 separados, para cada uno de los elementos del modelo de simulación estructural. Un aspecto novedoso del procedimiento 400 consiste en leer esos valores de  $\varepsilon_I$  y  $\varepsilon_{II}$ , convertirlos en los parámetros de entrada de las superficies de respuesta
- 5 ( $\beta$  y  $\varepsilon_T$ ) y, mediante las superficies de respuesta obtenidas, calcular las diferentes constantes elasto-plásticas para cada pareja ( $\beta$ ,  $\varepsilon_T$ ). Cada grupo de esas constantes generado, permite generar un modelo de material diferente en el que ya se tiene en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre las propiedades elasto-plásticas. Esto generaría tantos materiales diferentes como pares  $\beta$  y  $\varepsilon_T$ , es decir, prácticamente un
- 10 material por cada elemento. Para evitar el desmesurado tamaño que podría llegar a tener el fichero de materiales y propiedades se puede emplear, en base al diseño de experimentos, un número manejable y a la vez representativo de materiales para ser asignados definido por rangos de valores de  $\beta$  y  $\varepsilon_T$ .
- 15 En esta etapa de asignación de los parámetros elasto-plásticos estimados a partir de superficies de respuesta 470 se pueden emplear una serie de macros o programas denominados *scripts*. En una realización particular se consideran dos scripts diferentes. El primer script, script de creación de materiales 472, se encarga de crear tanto el material como la sección de los elementos en formato ABAQUS y definirlos dentro del modelo
- 20 escogido, utilizando como dato de entrada los ficheros de parámetros elasto-plásticos generados. El segundo script, script de asignación de materiales por rangos de deformación 474, se encarga de leer los datos de deformación mayor y menor de los ficheros da salida 468 de resultados generados en la etapa de mapeado 460 y asignar cada elemento, en función de sus valores  $\beta$  y  $\varepsilon_T$ , a su material correspondiente generado anteriormente. Al final
- 25 de la ejecución del segundo script se dispone de una probeta con la forma final tras el proceso de embutición en la que, por zonas, tiene asignadas diferentes secciones (material, espesor) dependiendo de su estado de deformación final tras la embutición. Como máximo, cada probeta tendrá un número determinado de secciones diferentes asignadas.
- 30 De este modo, mediante los scripts desarrollados, el modelo estructural de simulación queda automáticamente definido con un material y espesor correspondiente para cada rango de deformación definido y sufrido durante el proceso de embutición, asignados a cada grupo de

elementos con estados de deformación dentro de esos mismos rangos de deformación. Al tratar de simular ahora, con ese modelo, cualquier caso de carga al que vaya a ser sometido ese componente, este ya tiene en cuenta la afectación del proceso de embutición sobre las propiedades del material.

5

Finalmente se procede a la validación de resultados 480, en la que se realiza una validación del modelo estructural 482 y se comprueba si el nuevo modelo de simulación estructural, en el que se han asignado mediante scripts los diferentes materiales a partir de las superficies de respuesta, reproduce las características de resistencia mecánica correspondiente al componente real. Para la realización de esta validación se lleva a cabo una simulación del ensayo de tracción uniaxial 484 empleando probetas predeformadas extraídas de los modelos de simulación de embuticiones Marciniak, tras haber asignado a estos los diferentes materiales por zonas en función de su estado de deformación, permitiendo de este modo analizar la correlación numérico-experimental obtenida.

15

Esta extracción de probetas para simular se lleva a cabo superponiendo la geometría de la probeta normalizada del ensayo de tracción uniaxial, sobre el modelo de probeta Marciniak, en la misma zona en la que se cortaron las probetas uniaxiales reales en las muestras embutidas. De esta manera se puede correlar la curva tensión-deformación obtenida de cada simulación, con la medida en el ensayo real para esas mismas condiciones. Dado que no se puede “cortar” exactamente la geometría de una probeta normalizada de tracción uniaxial, partiendo del modelo de elementos finitos de la probeta Marciniak, se realiza un modelo de elementos finitos de la probeta de tracción uniaxial y se le asignan las mismas secciones, por zonas, que le corresponderían si se hubiese extraído de la probeta embutida.

25

## REIVINDICACIONES

5 1. Procedimiento de diseño y fabricación de componentes metálicos estampados en frío, caracterizado por que comprende:

- realizar ensayos de caracterización del material (410) del componente en condiciones de suministro, incluyendo ensayos de tracción uniaxial (412) para extraer parámetros elasto-plásticos del material (414);
- una etapa de diseño de experimentos (420) basado en superficies de respuesta;
- 10 - realizar ensayos de embutibilidad (430) en función de los experimentos propuestos en la etapa de diseño de experimentos (420), incluyendo ensayos de embutición Marciniak (432) para extraer medidas de deformación y parámetros elasto-plásticos del material de cada ensayo Marciniak;
- una etapa de simulación de ensayos de embutición (440), incluyendo simulaciones
- 15 de embutición Marciniak (442) para obtener un modelo estructural objetivo (464);
- una etapa de simulaciones de embutición inversas (450) para obtener un modelo fuente (466) con una estimación de los valores de deformación y cambios de espesor que tendrán lugar en el proceso de embutición;
- una etapa de transferencia de los resultados de embutición al modelo de simulación
- 20 estructural (460), que comprende un mapeado (462) de los resultados de deformación del modelo fuente (466) sobre el modelo estructural objetivo (464);
- una etapa de asignación (470) de los parámetros elasto-plásticos estimados utilizando las superficies de respuesta obtenidas del diseño de experimentos (420);
- una etapa de validación de resultados (480) para validar el modelo estructural
- 25 (482), llevando a cabo una simulación del ensayo de tracción uniaxial (484);
- una etapa de fabricación mediante un proceso de estampación en frío del componente utilizando el modelo estructural validado.

30 2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que los ensayos de caracterización del material (410) incluye un estudio de anisotropía (416) para caracterizar el material en diferentes orientaciones.

35 3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la etapa de diseño de experimentos (420) comprende una elección de parámetros de entrada y variables de salida (424), incluyendo parámetros de ensayo y parámetros de



probeta.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado por que los parámetros de ensayo comprenden al menos uno de los siguientes:

- 5           - diámetro del punzón;
- radio de acuerdo punzón;
- diámetro de la matriz inferior;
- radio de acuerdo matriz inferior;
- velocidad de ensayo;
- 10          - profundidad de embutición; o
- una combinación de los mismos.

5. Procedimiento según la reivindicación 3 o 4, caracterizado por que los parámetros de probeta comprenden al menos uno de los siguientes:

- 15          - material;
- espesor;
- anchura de probeta; o
- una combinación de los mismos.

20   6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la realización de ensayos de embutibilidad (430) comprende una etapa de medida del estado de deformación (436) mediante rejilla de control para la determinación de las deformaciones menor y mayor.

25   7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la simulación de ensayos de embutición (440) comprende una etapa de calibración (444) del material utilizándose uno de los ensayos de tracción uniaxial (412) como valor de referencia.

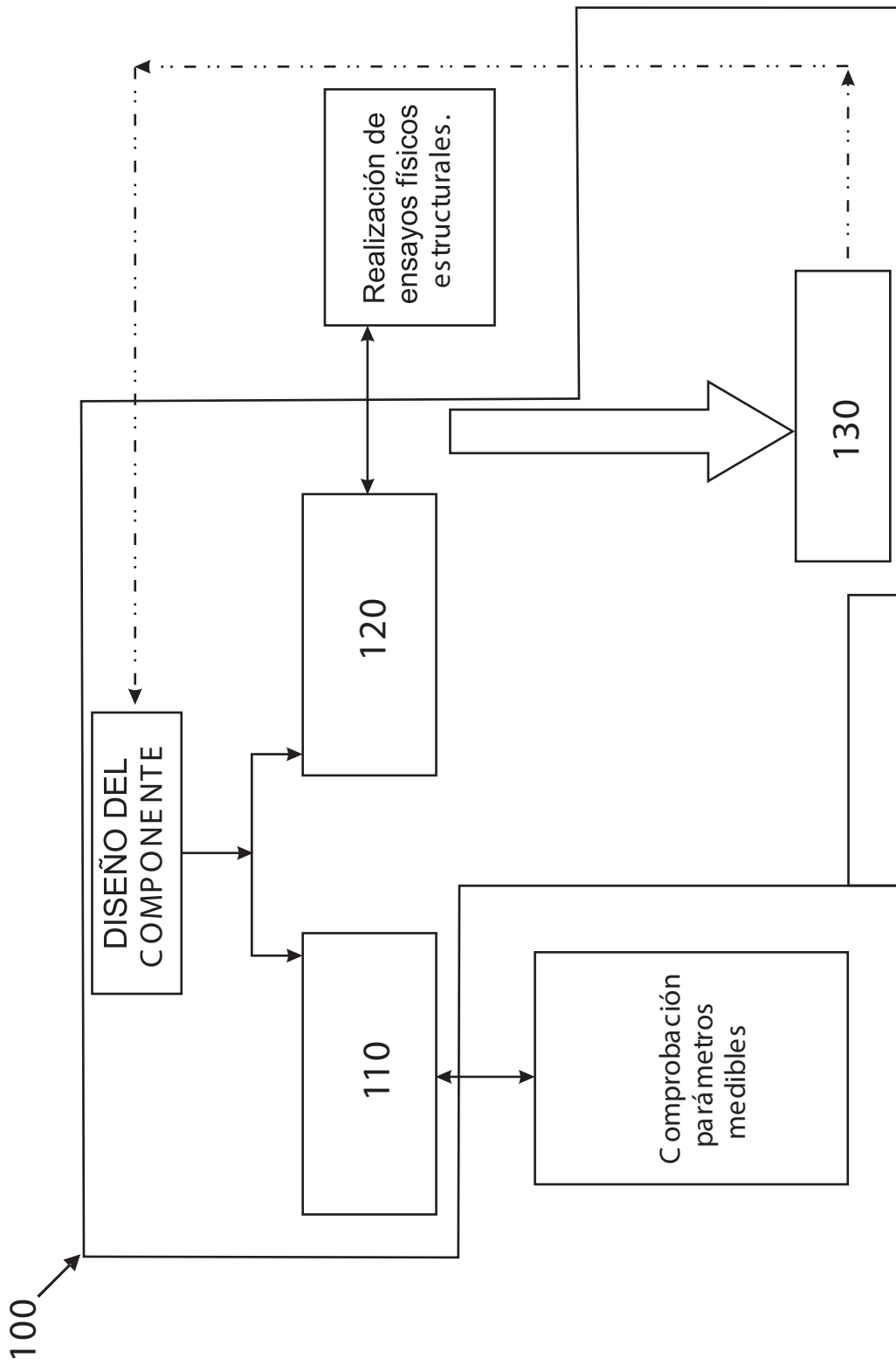


Fig. 1A

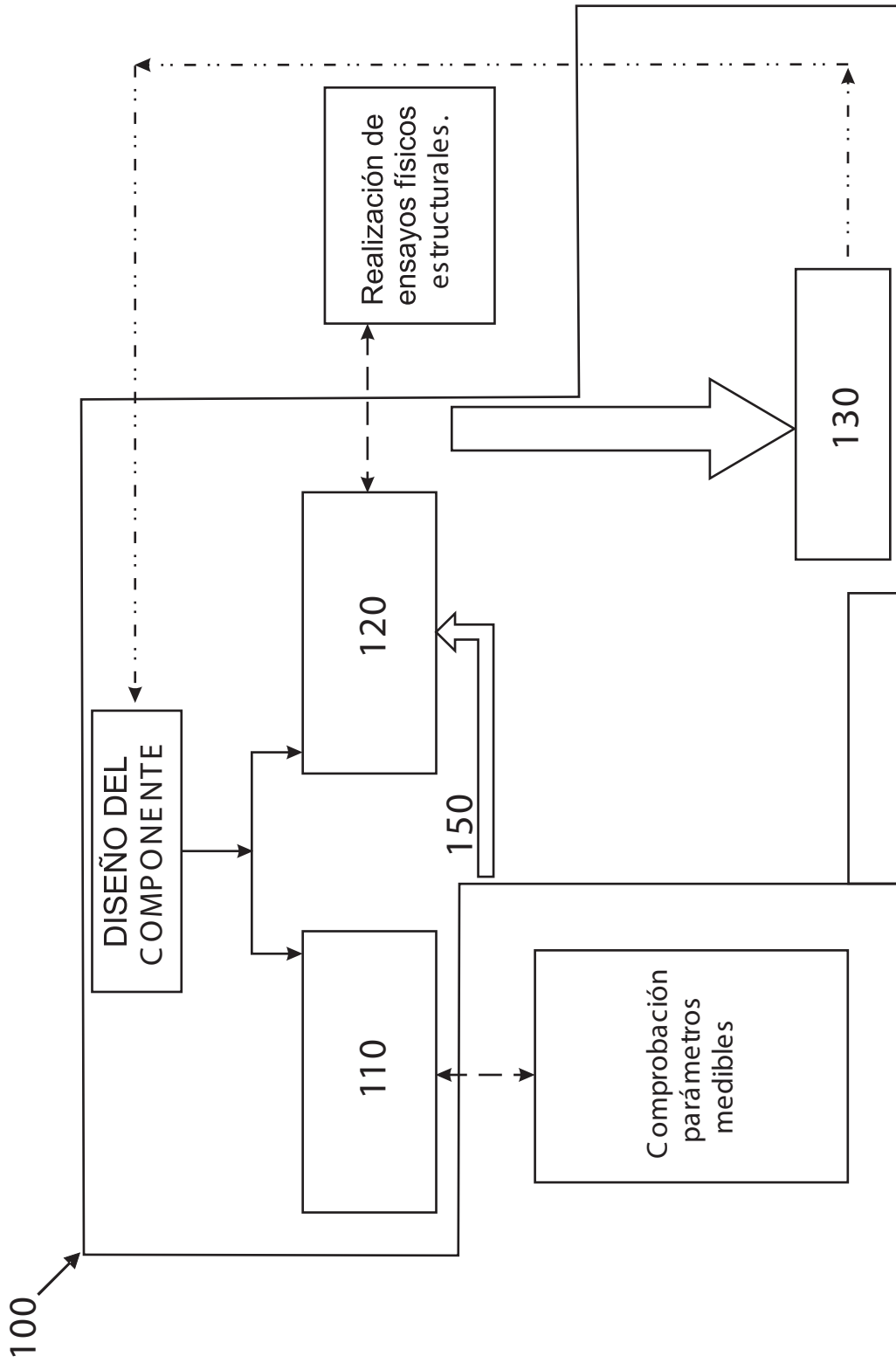


Fig. 1B

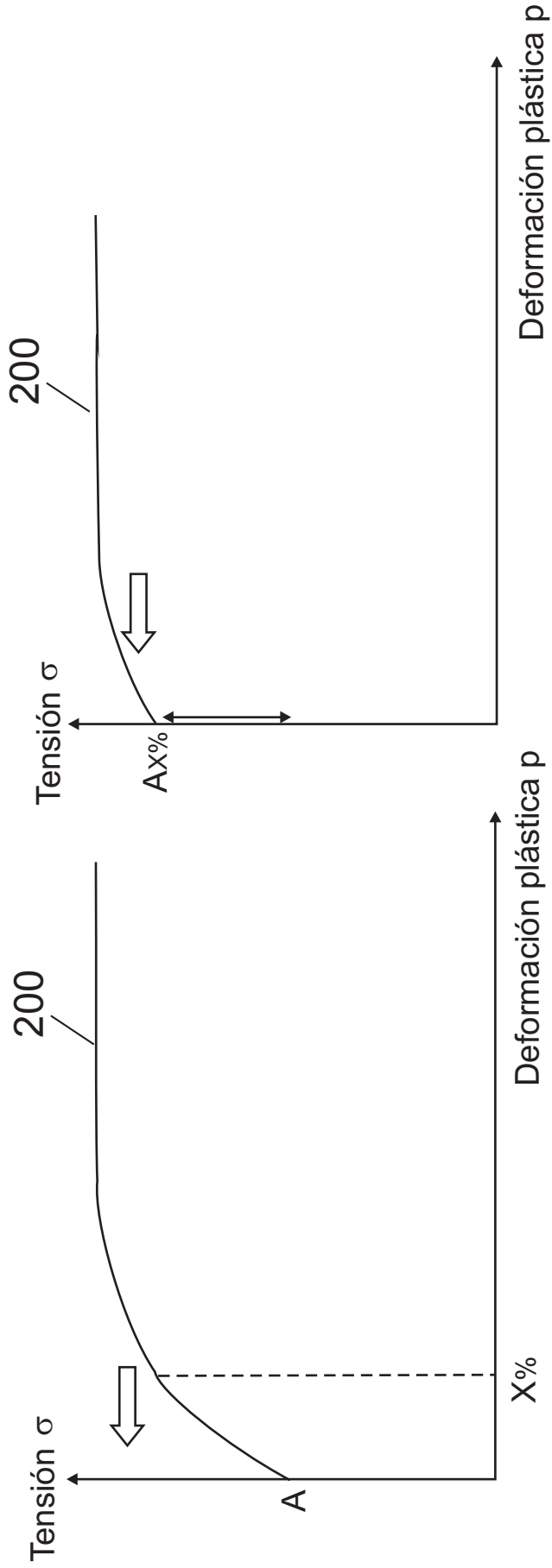


Fig. 2B

Fig. 2A

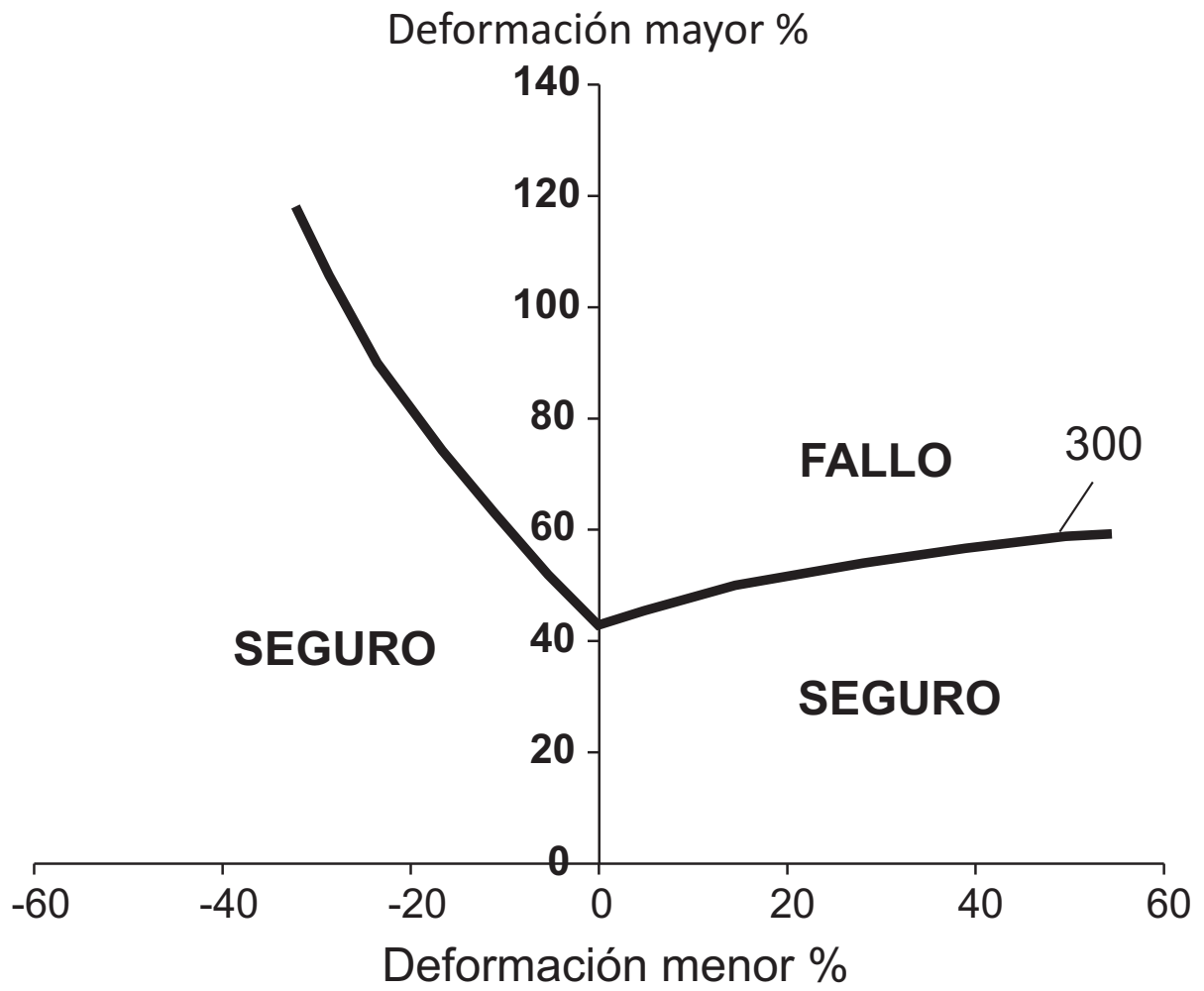


Fig. 3

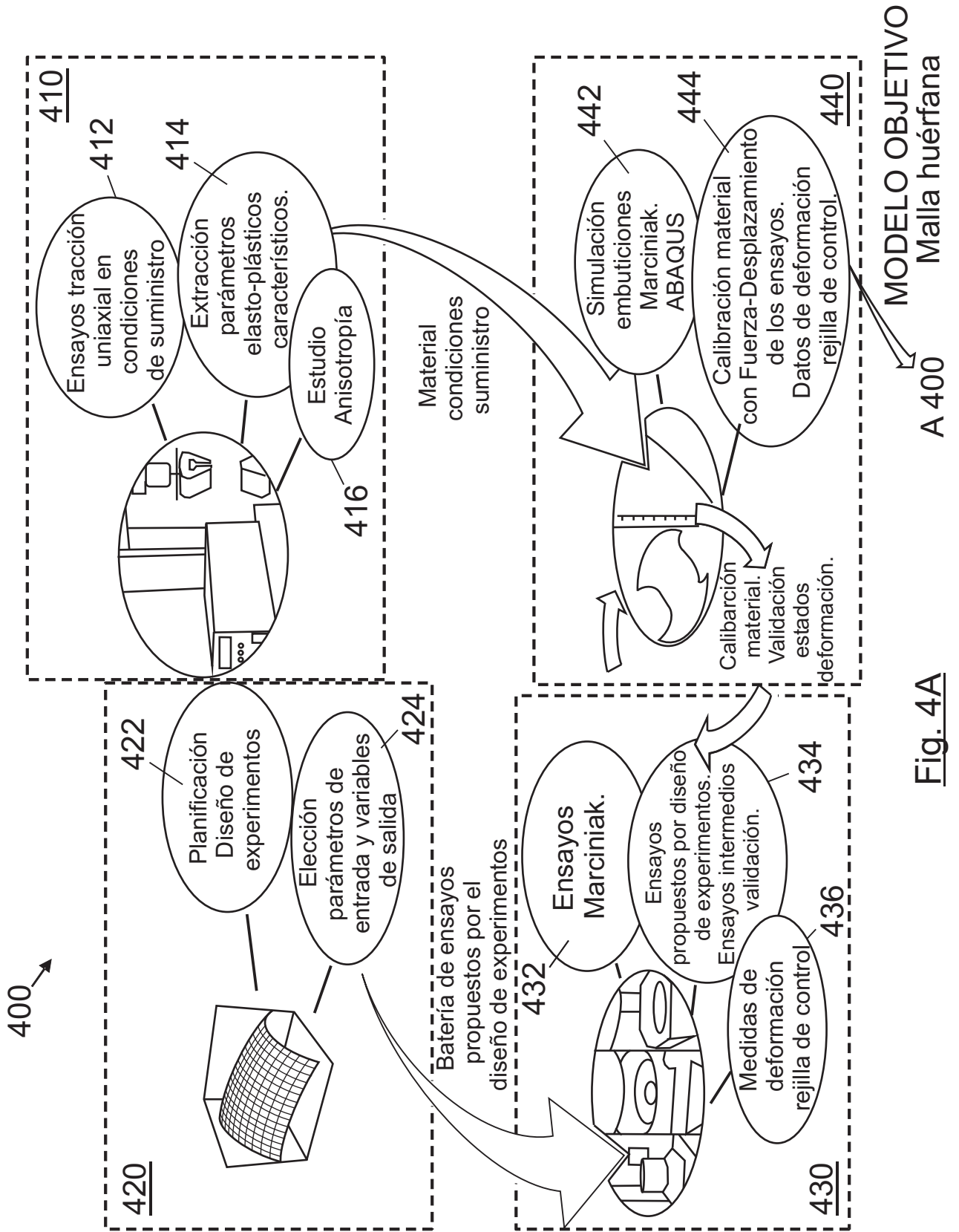


Fig. 4A



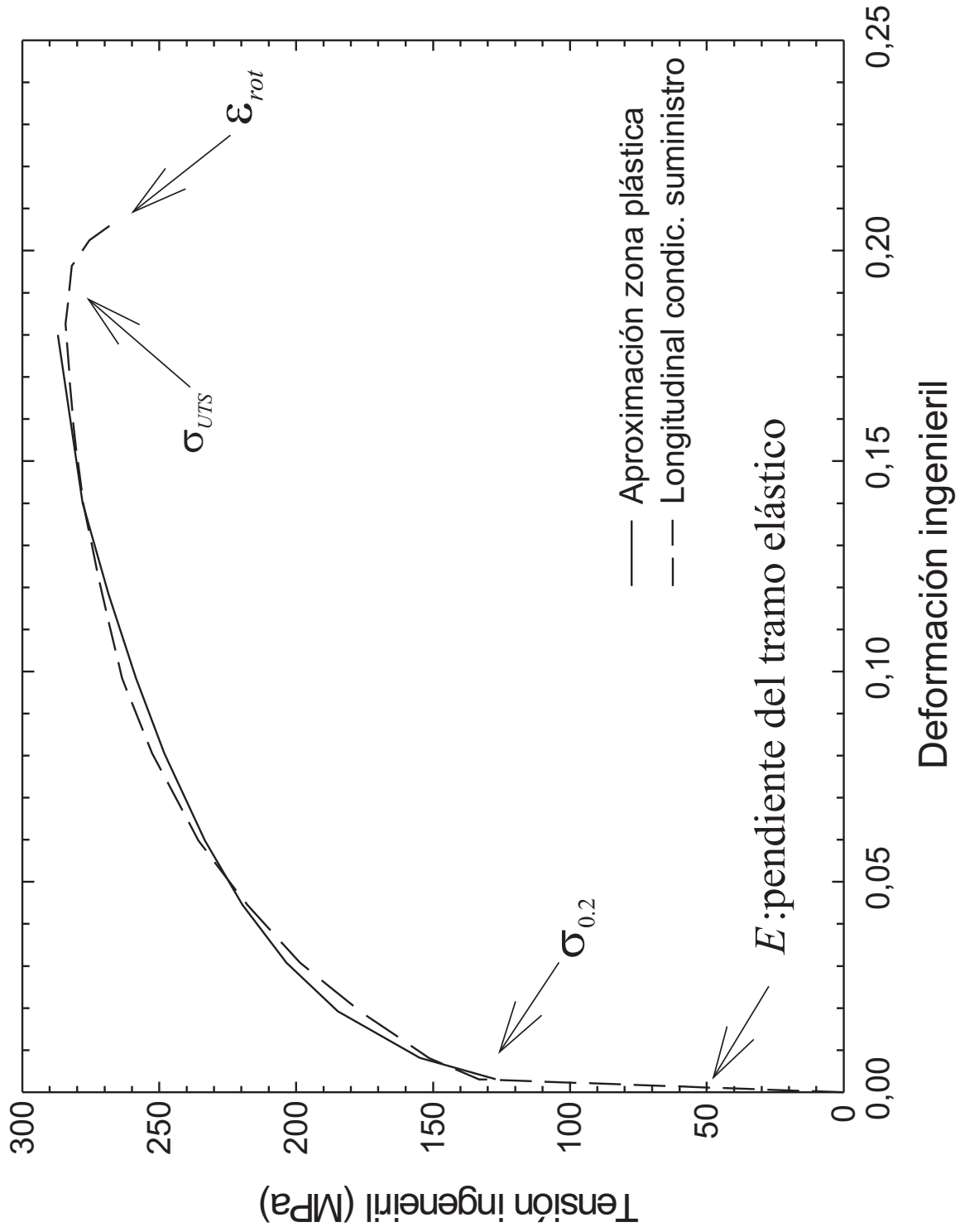


Fig. 5



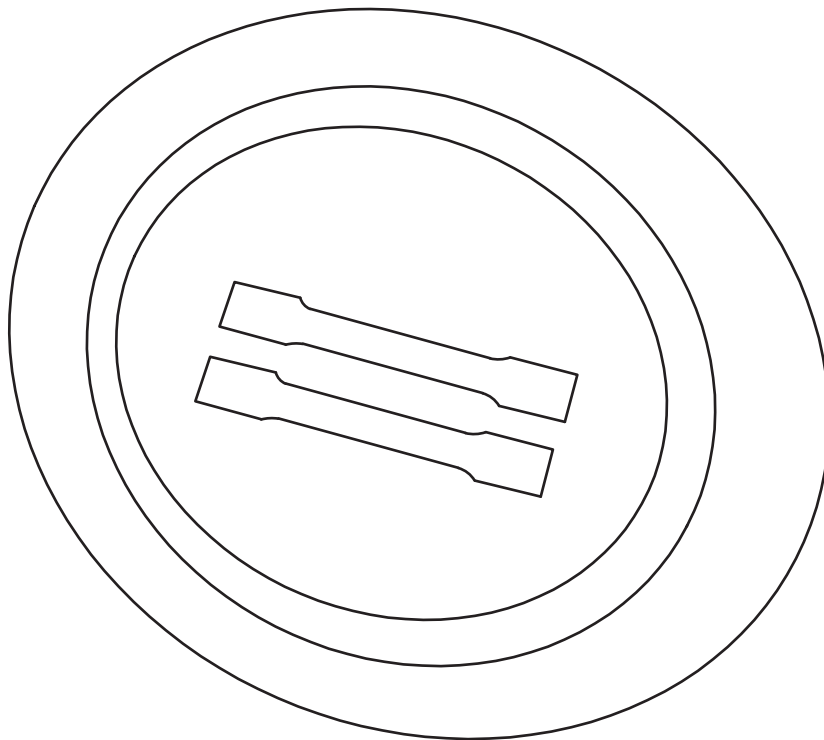
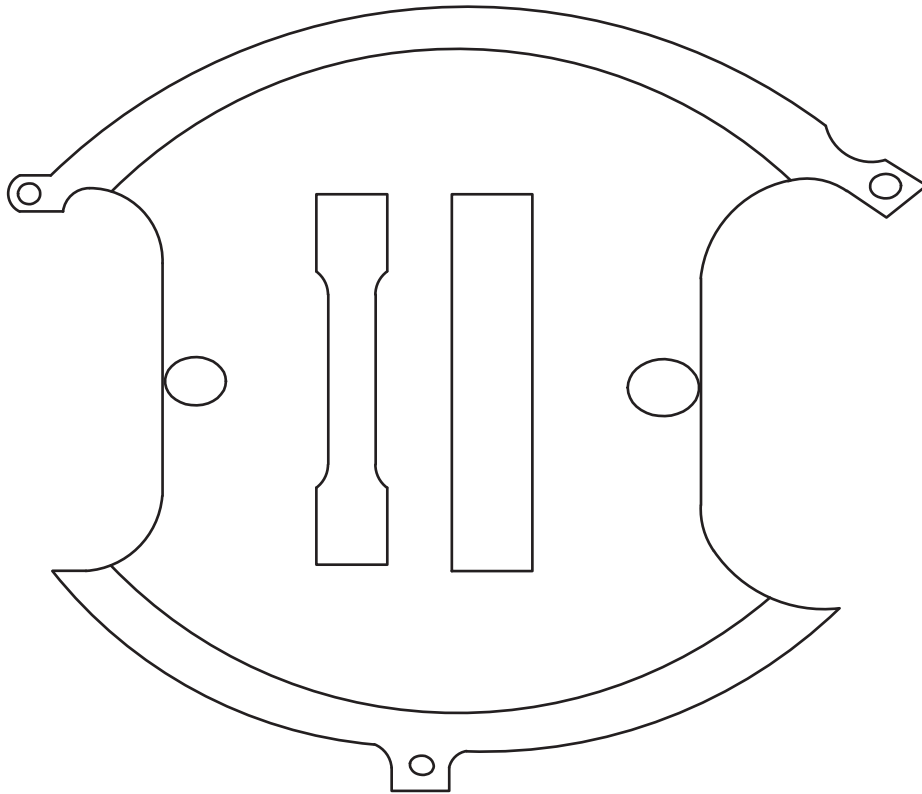


Fig. 6

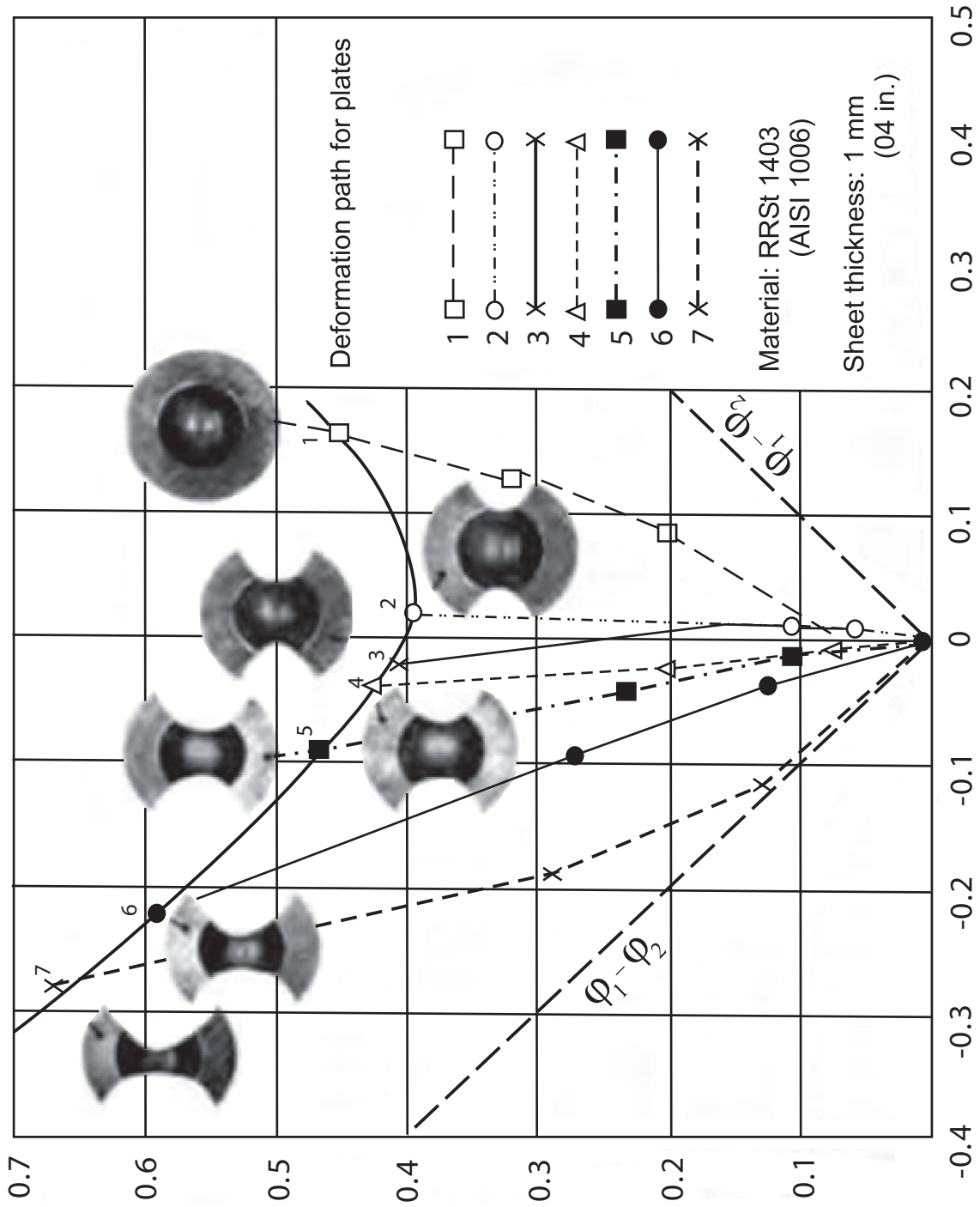


Fig.7

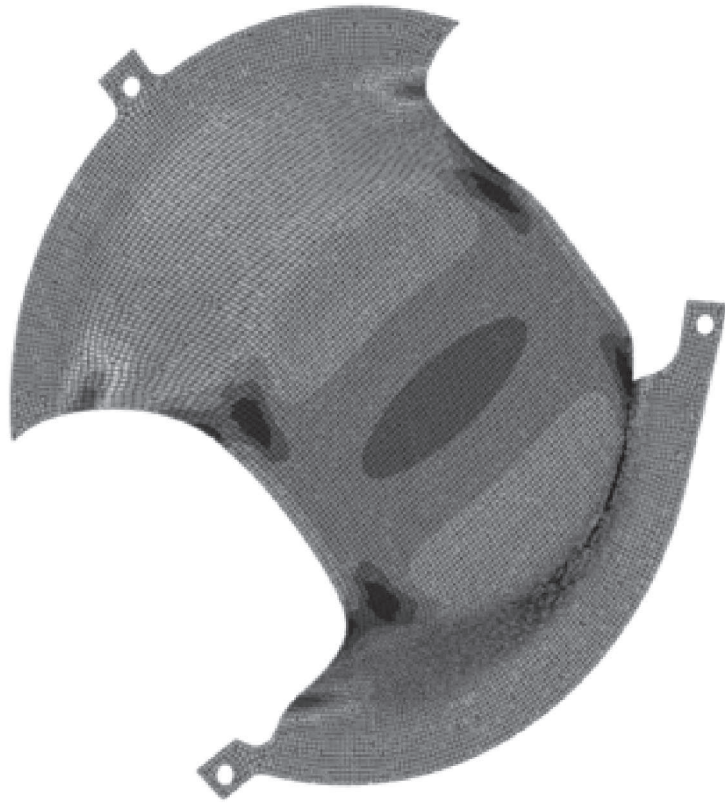
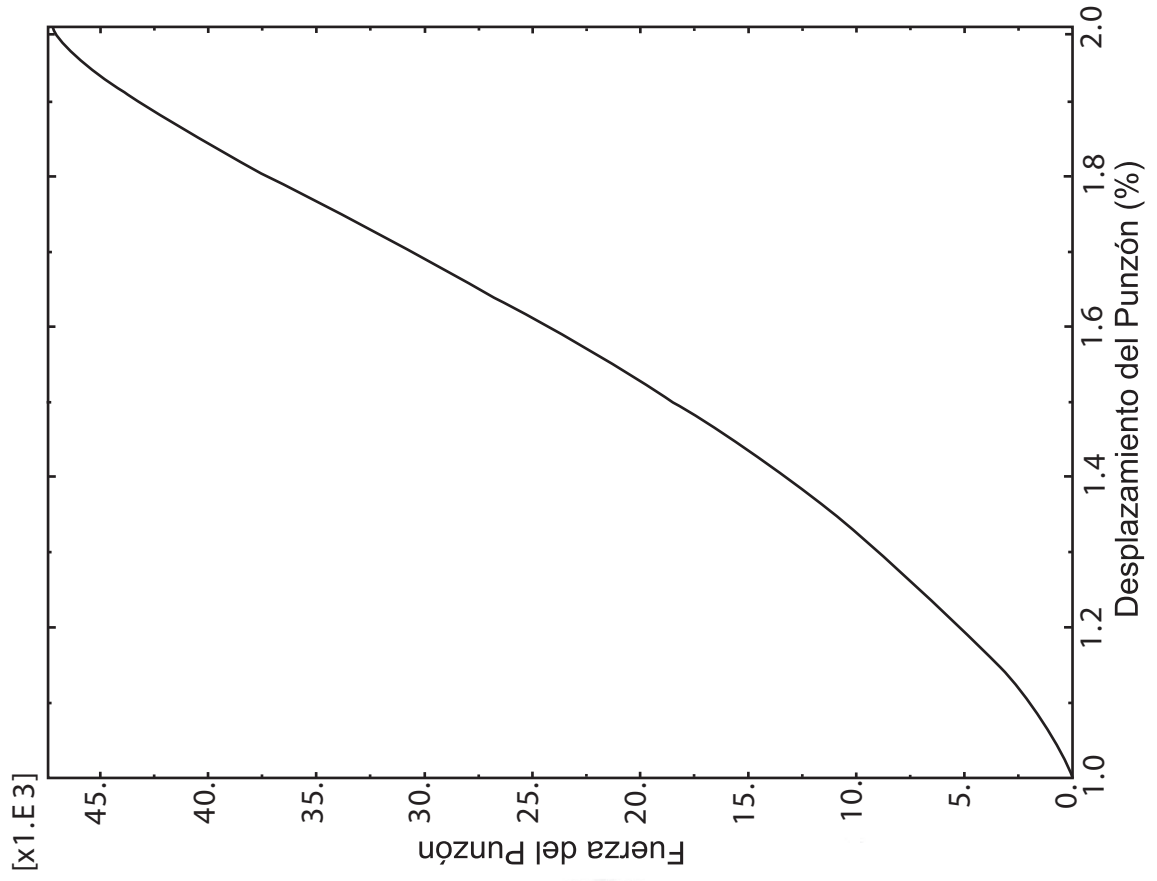


Fig. 8

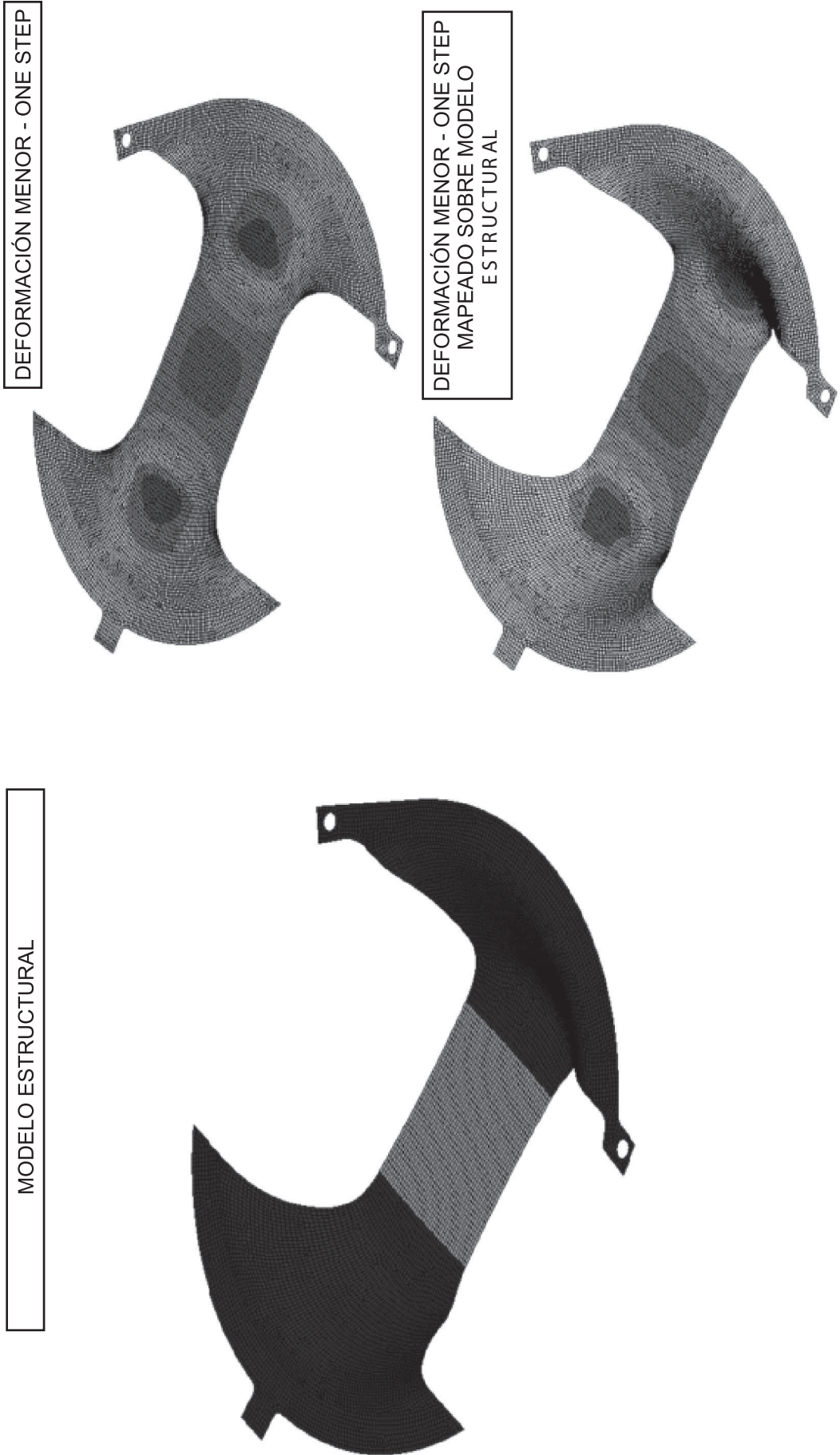


Fig. 9