

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN PROFUNDA: APLICACIÓN A UN CASO INDUSTRIAL**

**Claudio M. García<sup>\*</sup>, Diego J. Celentano<sup>\*</sup> y Fernando G. Flores<sup>†</sup>**

<sup>\*</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile  
Avda. Bdo. O'Higgins 3363 – Santiago de Chile – CHILE  
e-mail: claudio.garcia@usach.cl, dcelenta@lauca.usach.cl

<sup>†</sup> Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba  
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba – ARGENTINA  
e-mail: fflores@efn.uncor.edu

**Palabras clave:** Embutición profunda, Simulación de procesos, Deformaciones plásticas.

**Resumen.** *En este trabajo se realiza un análisis numérico y experimental del proceso de embutición profunda. Para ello se resuelven las ecuaciones de la mecánica de medios continuos con un modelo constitutivo adecuado que incluye los efectos del contacto de la chapa con las herramientas. Para la solución del modelo matemático se realiza una simulación numérica a través del método de elementos finitos usando una formulación de lámina. El modelo se valida con mediciones correspondientes a una aplicación industrial para la fabricación de una pieza del cuerpo de una lavadora semiautomática.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de manufactura más empleados en la industria se encuentra el proceso de embutición profunda de láminas o chapas metálicas. Éste consiste, básicamente, en deformar en frío plásticamente una lámina metálica plana (chapa) pre-cortada, transformándola en un objeto hueco sin costuras que no presente un excesivo arrugamiento y que, además, no experimente un gran adelgazamiento que pueda ocasionar la fractura de la pieza.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis experimental y numérico del proceso de embutición profunda de una pieza industrial que consiste en el cuerpo inferior de una lavadora semiautomática de uso doméstico. Se describen en primera instancia los diversos aspectos relativos al proceso de fabricación de dicha pieza. Posteriormente, se presentan los resultados de la simulación de este proceso y, por último, la validación de los mismos con las correspondientes mediciones experimentales.

La simulación se realiza a través de un programa de cálculo que ya ha sido ampliamente usado en procesos de embutición<sup>1</sup>. A continuación se mencionan sólo algunos detalles de la formulación mecánica adoptada para el análisis de la presente aplicación industrial (una descripción acabada de dicha formulación se escapa de los alcances del presente trabajo; mayores detalles de la misma pueden consultarse en [1-4]). El modelo utilizado consiste en resolver la ecuación de movimiento considerando los efectos del contacto y fricción de la chapa con las herramientas. La ley tensión-deformación se plantea en función de las respectivas medidas de Hencky en el contexto de la teoría de la plasticidad con grandes deformaciones. El flujo plástico que experimenta la chapa se describe por medio del modelo de Hill 48 suponiendo un endurecimiento isótropo por deformación de tipo potencial. La solución de este modelo se realiza en el marco del método de elementos finitos usando una formulación de lámina y un esquema explícito de diferencias finitas para la discretización temporal.

## 2 APLICACIÓN INDUSTRIAL: EMBUTICIÓN DE LA PARTE INFERIOR DEL CUERPO DE UNA LAVADORA DE USO DOMÉSTICO

### 2.1 Descripción del problema

En esta sección se presenta el proceso de embutición profunda en una aplicación industrial que corresponde a la fabricación de una parte del cuerpo de una lavadora semiautomática de uso doméstico marca Fensa<sup>5</sup>. Las diferentes partes de esta lavadora son los cuerpos inferior, medio, superior y la tapa; ver Figura 1. En este trabajo se analiza el proceso de fabricación del cuerpo inferior (indicado con un círculo rojo en la Figura 1).

### 2.2 Prensa y matriz utilizada

La máquina utilizada en el proceso de embutición es una prensa hidráulica marca Spiertz. Dicha máquina puede ser apreciada en la Figura 2. Las presiones de operación durante el embutido varían, dependiendo fundamentalmente del tipo de acero, desde los 11 a 14 MPa (110 a 140 bar).



Figura 1: Lavadora semiautomática marca Fensa modelo 5100.

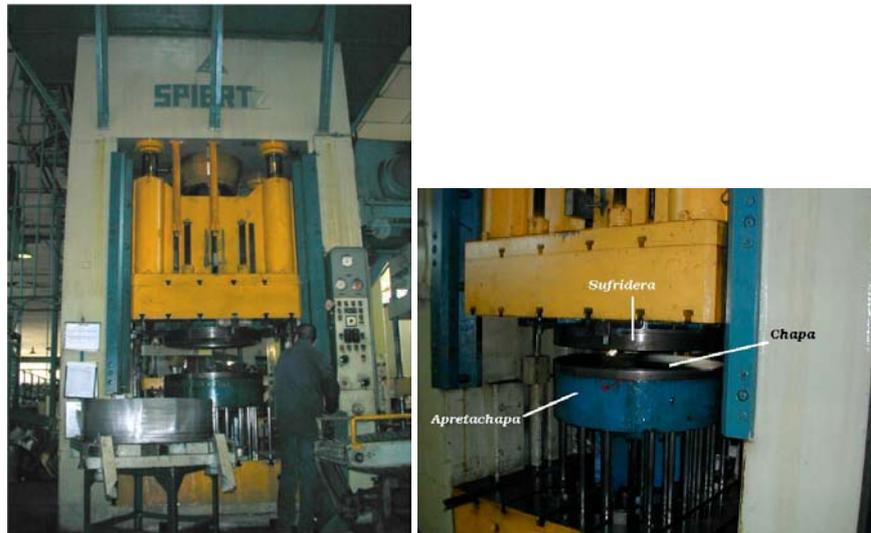


Figura 2: Prensa hidráulica marca Spiertz y vista de las herramientas utilizadas en el proceso.

En la Figura 3 se presenta, en forma esquemática, un corte longitudinal de las distintas herramientas involucradas en el proceso. Éstas consisten en un punzón, un contrapunzón, un apretachapa y una sufridera. La sufridera (también denominada matriz), el apretachapa y la chapa que se emplea en la fabricación del cuerpo inferior pueden también observarse en la Figura 2. Nótese que tanto el punzón como el contrapunzón no se aprecian en la vista de la Figura 2 ya que los mismos se encuentran en el interior del apretachapa y la sufridera, respectivamente.

En la Figura 4 se aprecia una vista del punzón desmontado durante los tiempos improductivos del proceso. Se procedió a medir a sus dimensiones y las correspondientes al resto de los elementos de la matriz. Con estas dimensiones se construyó el respectivo CAD en tres dimensiones con el objeto de, tal como se expondrá más adelante en el apartado de

simulación del proceso, realizar posteriormente un mallado de elementos finitos de estas herramientas.

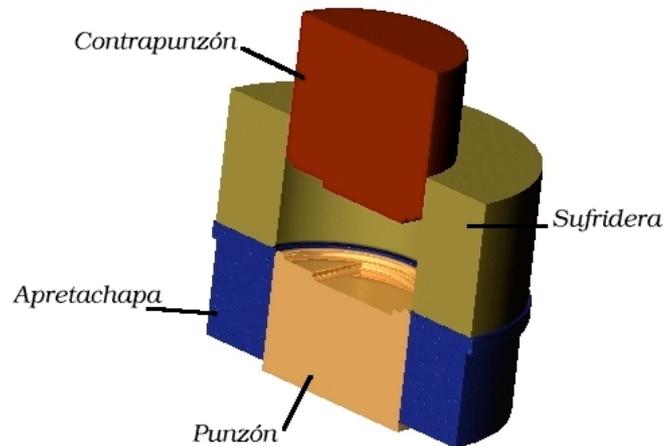


Figura 3: Corte de las distintas herramientas a partir del CAD del conjunto.



Figura 4: Fotografía del punzón y CAD 3D del mismo.

### 2.3 Descripción del proceso de fabricación

El acero que se utiliza para la fabricación del cuerpo inferior de esta lavadora se denomina comercialmente como acero EK4. Sus propiedades, tanto químicas como mecánicas, fueron analizadas con detalle en [6]. El inicio de este proceso de embutición se realiza precortando la chapa, cuyo espesor es de 0.6 mm, en un disco de 930 mm de diámetro. A continuación se coloca la chapa sobre el apretachapa y luego se esparce con una brocha una capa de lubricante sobre ella; ver Figura 5(1). Después se acciona la máquina desde el tablero, entonces la sufridera bajará y topará suavemente con el apretachapa aplicando una fuerza sobre el mismo;

ver figura 5(2). A continuación, el conjunto formado por la sufridera, la chapa y el apretachapa baja lentamente mientras el punzón se mantiene solidario a la parte inferior fija de la prensa; ver figura 5(3). Así, la chapa adopta la forma cilíndrica del punzón. Luego el conjunto sufridera- chapa-apretachapa se detiene y el contrapunzón baja generando la forma final del fondo del cuerpo inferior; ver figura 5(3). Por último, se eleva el contrapunzón y la sufridera a su posición original quedando la pieza embutida en su forma final; ver Figura 5(4).

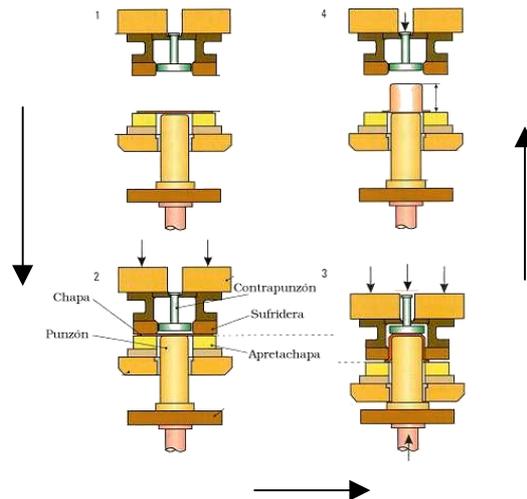


Figura 5: Descripción del proceso. (1) Montaje de la chapa, (2) descenso de la sufridera y aplicación del apretachapa, (3) embutición del punzón y del contrapunzón y (4) ascenso de la sufridera y expulsión de la pieza.

Para poder entender mejor el proceso, específicamente las etapas de embutición del punzón y contrapunzón, se realizó una embutición parcial, es decir, se detuvo el punzón a media carrera obteniéndose la pieza semi-embutida que se muestra en la Figura 6(1). Como puede observarse, esta pieza es un cilindro con fondo plano ya que todavía el contrapunzón no ha actuado sobre la chapa. Una vez que el cilindro ya está embutido en su totalidad por medio del punzón, se realiza a continuación la etapa de embutición del fondo a través del descenso del contrapunzón. La pieza resultante final es la que se muestra en la Figura 6(2). El fondo del cuerpo inferior se utiliza para la construcción de la tapa de la lavadora.

Cabe señalar que la presión de aceite indicada en el tablero de la prensa alcanzó el valor de 12 MPa (120bar) durante el proceso. Además es importante aclarar que este proceso es de una sola operación para la que no es necesario realizar embuticiones posteriores.

También se midió la velocidad de descenso de la sufridera y del apretachapa. Para ello se registró el tiempo que demoraba el conjunto sufridera y apretachapa en desplazarse una distancia vertical de 14 cm. De estas mediciones se desprende que la velocidad promedio de descenso del conjunto sufridera y apretachapa es de 35.4 cm/min.

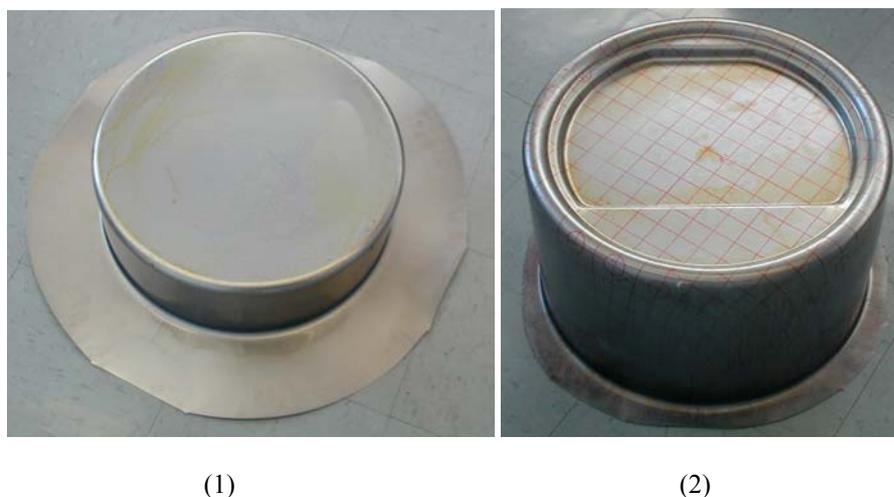


Figura 6: Piezas embutidas en la tercera etapa. (1) Pieza a media carrera del punzón y (2) pieza final.

## 2.4 Simulación de la embutición del cuerpo inferior de una lavadora de uso doméstico

Se presentan a continuación los resultados de la simulación del proceso de fabricación por embutición profunda del cuerpo inferior de una lavadora presentado en los apartados anteriores.

Las propiedades del material junto con algunos parámetros propios del proceso utilizados en la simulación numérica se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades del material y parámetros usados en la simulación.

Propiedades del acero de embutición profunda EK4	
Módulo de Young ( $E$ )	212 [GPa]
Relación de Poisson ( $\nu$ )	0.32
Parámetro de endurecimiento ( $A^p$ )	566.0 [MPa]
Parámetro de endurecimiento ( $n^p$ )	0.345
Límite de Proporcionalidad ( $C^{th}$ )	178 [MPa]
Densidad ( $\rho$ )	7850 [kg/m <sup>3</sup> ]
Coefficiente de Lankford ( $\bar{R}$ )	1.64
Parámetros del proceso y geométricos	
Coefficiente de roce	0.168
Fuerza del apretachapa	290 [kN]
Diámetro inicial de la chapa	930 [mm]
Espesor inicial de la chapa	0.600 [mm]

## 2.5 Malla empleada

Se ha discretizado la mitad del modelo geométrico debido a la simetría existente. En la figura 7 se muestra la malla utilizada en la simulación. La misma consta de 19819 elementos BST<sup>1-4</sup> (10101 nodos) en la chapa. Las herramientas se modelan como superficies rígidas y se

discretizan con elementos triangulares: las superficies del punzón, sufridera, apretachapa y contrapunzón han sido respectivamente discretizados con 4110, 900, 200 y 3922 elementos (correspondientes a 2119, 494, 126 y 2040 nodos). Para la integración numérica en el espesor se emplearon cuatro capas.

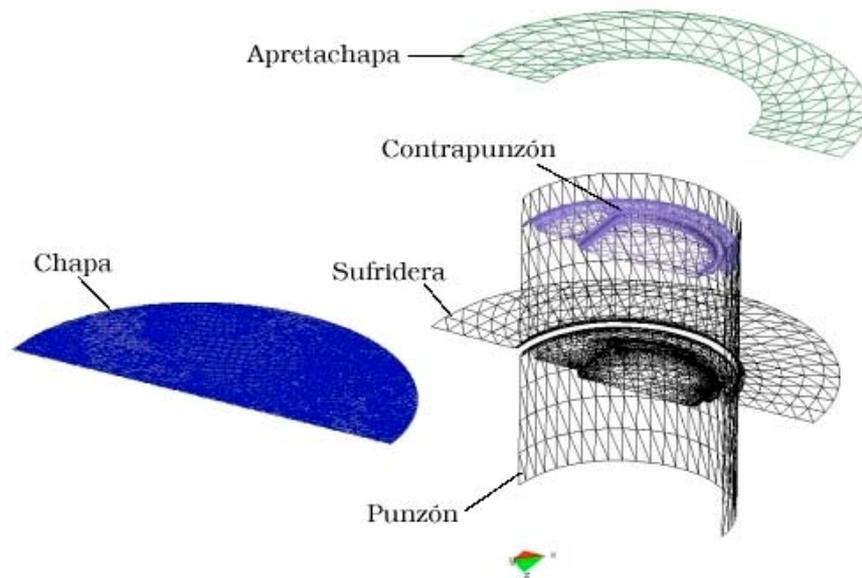


Figura 7: Discretización de elementos finitos de las herramientas y de la chapa. Elementos rígidos para el punzón, sufridera, apertachapa y contrapunzón. Elementos del tipo BST para la chapa.

## 2.6 Presentación y validación de resultados

Se analizó la distribución de distintas variables a lo largo de las tres líneas radiales en la chapa que se muestran en la Figura 8.

En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan los perfiles de deformación plástica efectiva  $\varepsilon^p$  obtenidos para distintas penetraciones del punzón a lo largo de las líneas O-A, O-B y O-C, respectivamente ( $r_0$  es la coordenada radial inicial). Estas curvas corroboran el hecho de que antes que actúe el contrapunzón ( $H < 31$  cm), las mayores deformaciones ocurren en la zona de la periferia de la chapa mientras que la región horizontal en contacto con el punzón sufre relativamente pequeñas deformaciones con distribución prácticamente uniforme. Además, puede observarse que existe aproximadamente simetría angular. Cuando actúa el contrapunzón ( $H = 31$  cm), las deformaciones plásticas se localizan en la zona de la tapa de la pieza.

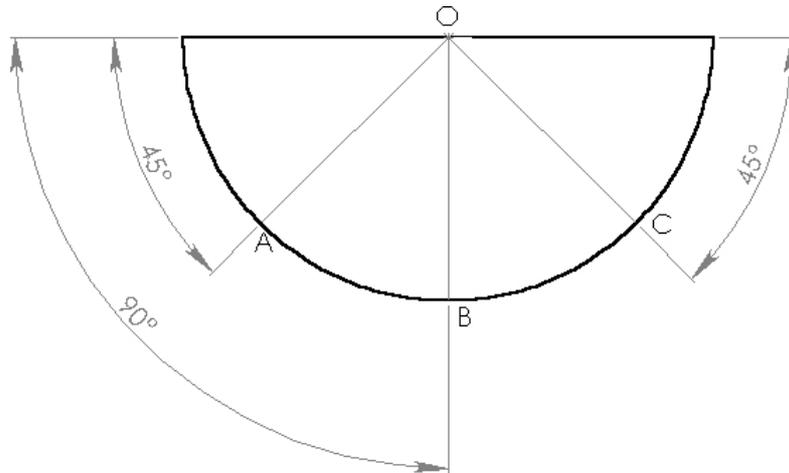


Figura 8: Líneas de la chapa analizadas.

Se analizó experimentalmente el movimiento de la chapa durante el proceso. Para ello se realizó un mallado sobre la chapa antes de embutir tal como se muestra en la Figura 12. La malla está compuesta de cuadrados de 31 mm de lado y, en algunos sectores, círculos de 29 mm de diámetro. La configuración geométrica de la malla después del embutido de la chapa puede observarse en la Figura 13. Es posible observar en dicha figura que el flujo de la chapa en el manto de la pieza es muy alto. Además, se aprecia que los cuadros del fondo de la zona central no sufren una deformación significativa.

Solamente para fines de visualización y comparación con las mediciones experimentales, en la simulación se trazó una malla sobre la chapa formada por cuadrados de 31 mm de lado igual a la mostrada en la Figura 12. La Figura 14 muestra la configuración que adopta dicha malla para diferentes penetraciones del punzón. Puede observarse que, mientras el contrapunzón no actúa ( $H < 31$  cm), los elementos en contacto con la cabeza del punzón sufren principalmente una traslación en la dirección de la penetración mientras que los elementos que pasan por el radio de la sufridera experimentan un fuerte efecto de flexión para luego, cuando fluyen entre el manto del punzón y la sufridera, ser estirados paulatinamente. Los elementos que se encuentran en la zona del apretachapa sufren una importante reducción en su perímetro. Cuando actúa el contrapunzón ( $H = 31$  cm), los elementos del fondo de la tapa que chocan con los bordes curvos de las herramientas se deforman fuertemente situación que no ocurre, por el contrario, con los elementos que chocan con las zonas planas de las herramientas. Nótese que la configuración deformada final se ajusta de manera razonable a la mostrada en la Figura 13.

En la Figura 15 se presenta una comparación cualitativa de las configuraciones geométricas finales entre una pieza embutida y la correspondiente simulación numérica. Puede observarse una buena similitud entre ambas configuraciones. Cabe señalar que el modelo usado, por ser isótropo en el plano de la chapa, no es capaz de capturar la leve formación de las orejas observada en el experimento.

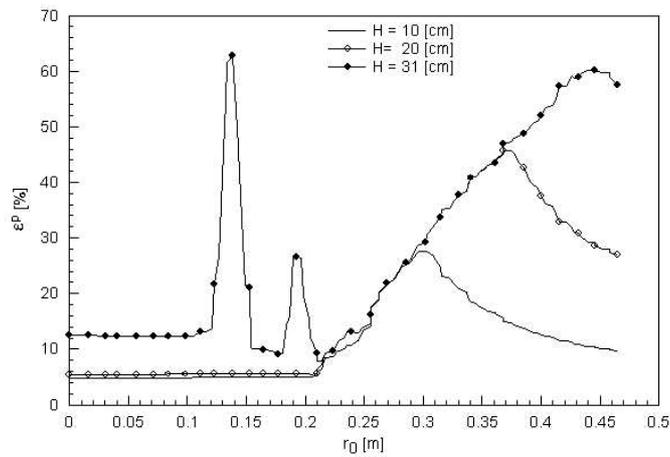


Figura 9: Perfiles de deformación plástica efectiva a lo largo de la línea O-A para distintas penetraciones del punzón: H=10, 20 y 31 [cm].

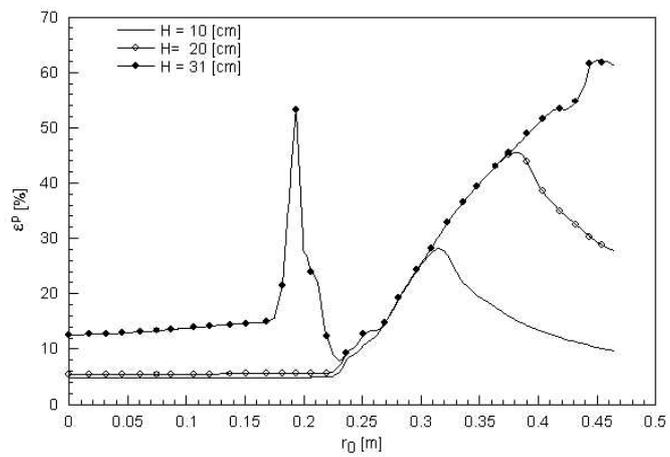


Figura 10: Perfiles de deformación plástica efectiva a lo largo de la línea O-B para distintas penetraciones del punzón: H=10, 20 y 31 [cm].

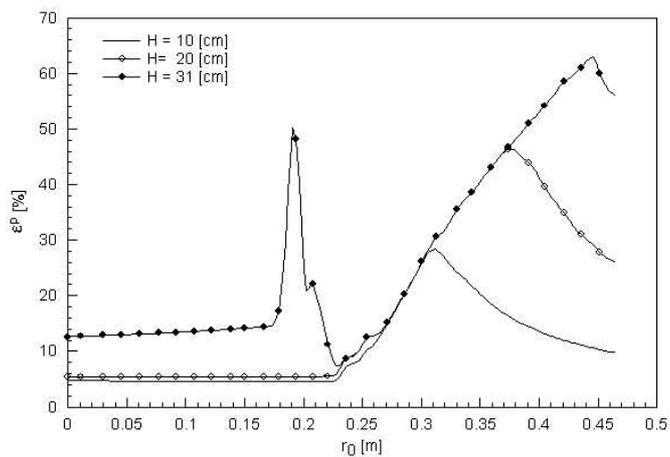


Figura 11: Perfiles de deformación plástica efectiva a lo largo de la línea O-C para distintas penetraciones del punzón: H=10, 20 y 31 [cm].

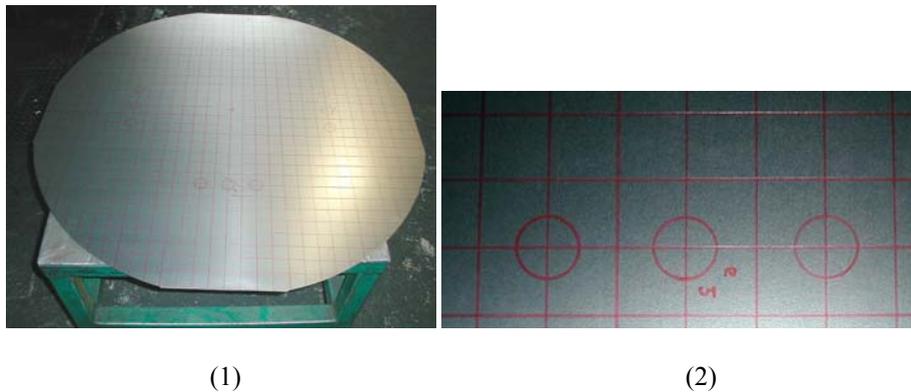


Figura 12: Chapa mallada. (1) Vista general y (2) detalle de los círculos.

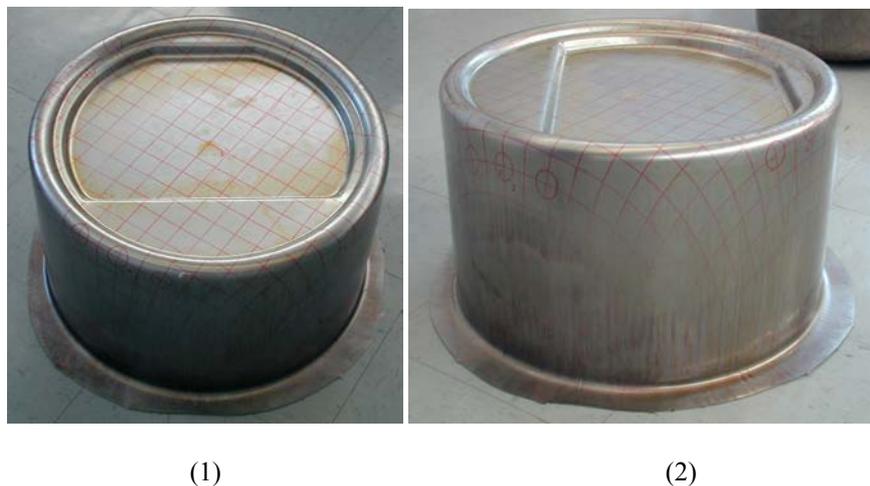


Figura 13: Malla deformada. (1) Vista superior y (2) vista lateral.

La Figura 16 muestra la fuerza ejercida por el punzón en función del desplazamiento o penetración del mismo. Se aprecia que la fuerza del punzón se incrementa rápidamente en los primeros 4 cm de penetración para luego crecer lentamente hasta los 16 cm de desplazamiento momento en que se alcanza el máximo valor de la fuerza durante la primera etapa del proceso. A partir de este punto, la fuerza decrece. El punzón, al llegar a los 31 cm de avance, se detiene terminando de esta forma su etapa de trabajo. Posteriormente, el contrapunzón baja y embute a la chapa de manera que el punzón actúa como una sufridera. En consecuencia, se produce un fuerte incremento de la fuerza sobre el punzón como reacción a este efecto.

En la Tabla 2 se presenta el valor de la carga máxima obtenida en la simulación numérica durante la primera etapa (sin la actuación del contrapunzón) y la calculada con algunos modelos simplificados disponibles en la literatura<sup>6,7</sup>. Cabe señalar que dichos modelos fueron desarrollados para describir el proceso de embutición de una copa cilíndrica de fondo plano. Se puede apreciar que las cargas máximas predichas por las ecuaciones simplificadas son

menores que la obtenida por medio de la simulación. Si bien no se cuenta con una medición en planta precisa de la carga máxima alcanzada durante la embutición, una estimación de la misma (obtenida a partir de la presión de aceite de la prensa y del diámetro de sus dos cilindros) arroja un valor un poco superior (10%) al calculado a través de la simulación.

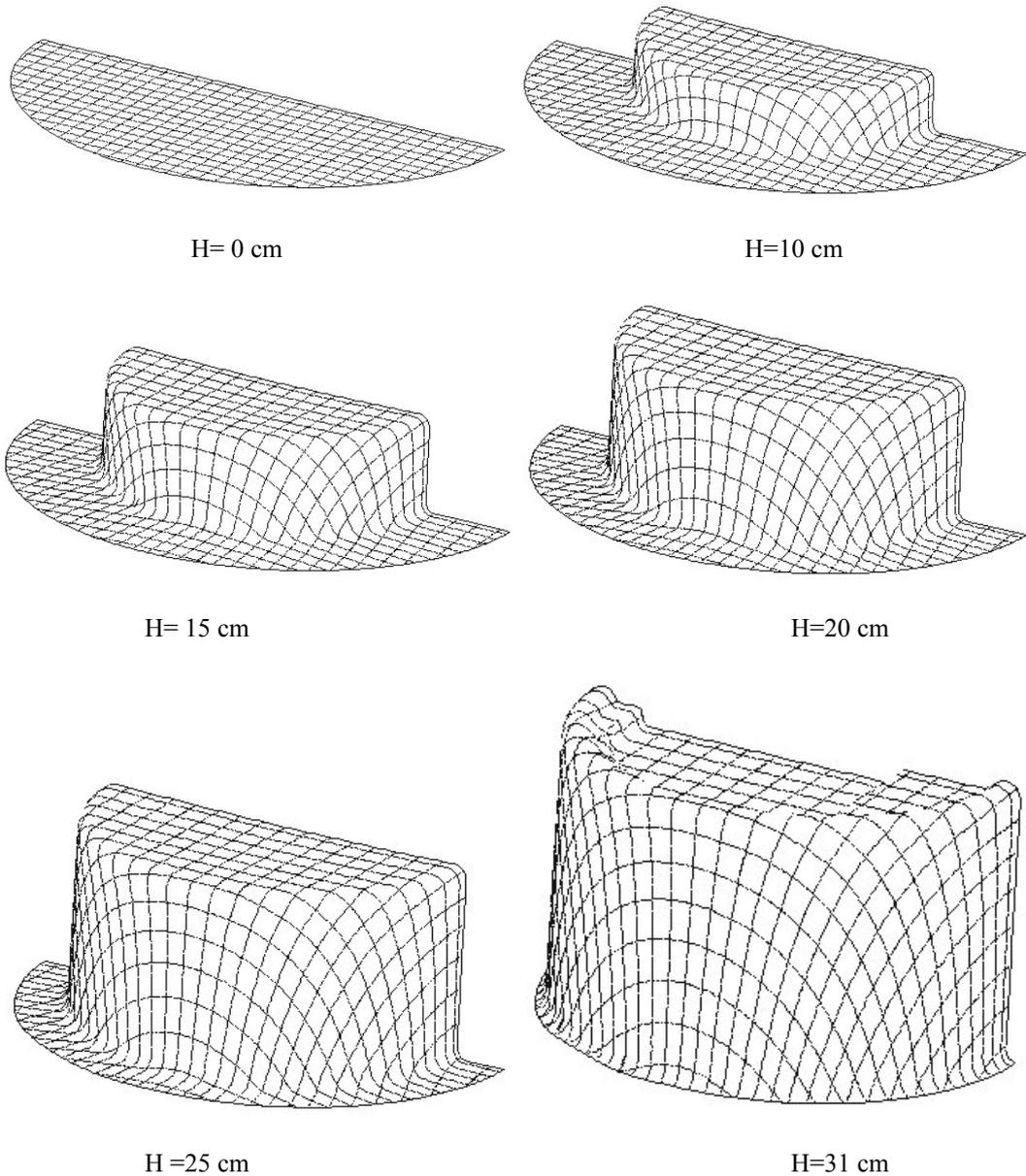


Figura 14: Configuración deformada de la chapa para distintas penetraciones del punzón.



Figura 15 Comparación de las configuraciones geométricas finales de la pieza embutida y de la obtenida por la simulación numérica.

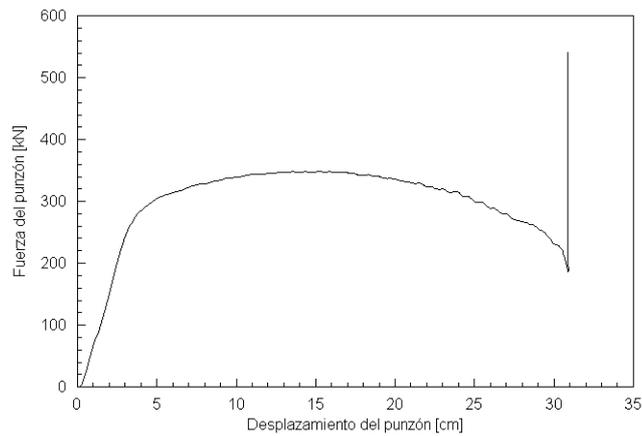


Figura 16: Fuerza del punzón en función del avance o penetración del mismo.

Tabla 2: Valores de la carga máxima.

Modelo	Carga Máxima [kN]
Groover <sup>7</sup>	311.6
Lopez Navarro <sup>8</sup>	277.8
Simulación (este trabajo)	349.2

La Figura 17 muestra la fuerza ejercida por el contrapunzón en función de su desplazamiento. Al igual que el punzón, el contrapunzón incrementa rápidamente su fuerza en los primeros centímetros de la embutición. El valor máximo que alcanza la fuerza del contrapunzón es 430 kN.

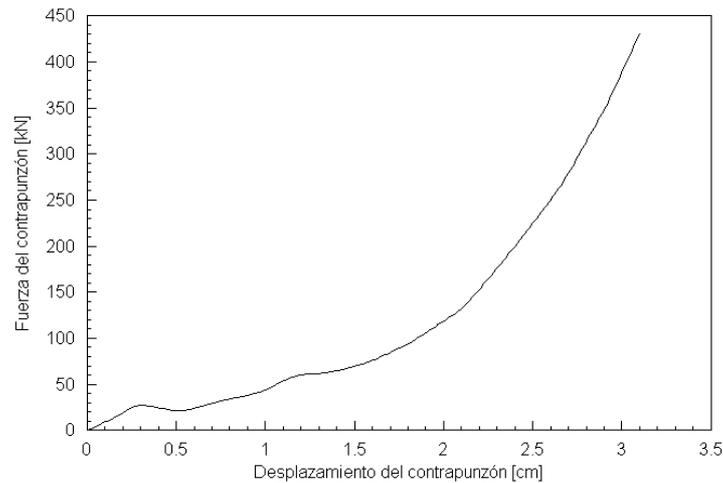


Figura 17: Fuerza del contrapunzón en función de su desplazamiento.

También se validó experimentalmente el espesor final predicho por el análisis numérico en distintas zonas de la copa embutida. Estos valores se comparan con las respectivas mediciones experimentales. Es importante mencionar que para la medición de los espesores se tuvo que cortar la pieza en forma longitudinal por medio de un disco de corte teniendo el cuidado de no cargar excesivamente la chapa durante esta operación. Las mediciones de espesor se realizaron en zonas alejadas de la línea de corte con el objeto de evitar las distorsiones locales en las medidas. En particular, se midió el espesor en el manto de la piezas para diferentes puntos situados a varias alturas "h" referidas a la base de la pieza final tal como se muestra en la Figura 18. Los valores obtenidos del espesor para dichos puntos se presentan en la Tabla 3. El error que se muestra en dicha tabla es respecto al valor experimental. Es posible observar que los espesores predichos por la simulación se ajustan satisfactoriamente a los obtenidos en los experimentos realizados en la fábrica. Existe una reducción del espesor para los puntos 1 al 9. Para el resto de los puntos (10 al 13), el espesor aumenta de la deformación circunferencial de contracción que sufre la chapa al verse arrastrada por el punzón en el sentido negativo de la dirección radial. El punto 2 presenta una reducción considerable del espesor y, por lo tanto, ésta es una de las zonas críticas de la chapa ya que, si no se controlan exhaustivamente algunos de los parámetros de operación como por ejemplo la fuerza del apretachapa, la misma puede eventualmente experimentar desgarramiento. Nótese, sin embargo, que este punto forma parte de la tapa de la lavadora la que no estará sujeta a grandes solicitaciones mecánicas durante su operación en servicio.

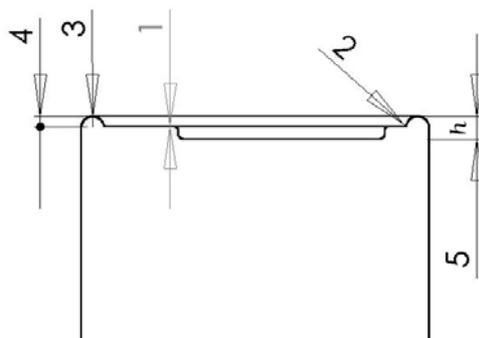


Figura 18: Posición “h” desde donde se midieron los espesores.

Tabla 3: Valores del espesor (b) en distintos puntos del cuerpo inferior.

Punto	h [mm]	Simulación [mm]	Experimental [mm]	Error [%]
1	15	0.546	0.549	0.55
2	15	0.510	0.499	2.20
3	0	0.558	0.563	0.88
4	15	0.552	0.555	0.54
5	30	0.564	0.568	0.70
6	60	0.562	0.571	1.58
7	90	0.568	0.586	3.07
8	120	0.582	0.593	1.85
9	150	0.595	0.611	2.62
10	180	0.612	0.624	1.92
11	210	0.632	0.643	1.71
12	240	0.672	0.674	0.30
13	270	0.684	0.683	0.15

### 3 CONCLUSIONES

Se ha analizado en este trabajo el proceso industrial de embutición profunda de una pieza de lavadora. En general, la calidad de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas puede ser considerada como muy buena ya que los mismos describen de manera razonable la respuesta de la chapa durante todo el proceso de deformación. En particular, se han validado experimentalmente de manera satisfactoria las deformaciones finales que experimenta la chapa. Finalmente, se puede concluir que la formulación mecánica empleada es capaz de simular correctamente este proceso contándose, entonces, con una herramienta útil para el diseño y la optimización de los procesos industriales de embutición profunda de chapas.

### 4 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos brindados por DICYT-USACH, por CONICYT

(Proyecto Fondecyt 1020026), por la Academia Politécnica Aeronáutica y por la Compañía Tecno Industrial (CTI) para el desarrollo de este trabajo.

## 5 REFERENCIAS

- [1] Stampack, “A General Finite Element System For Sheet Stamping Forming Problems”, Data Input Version 2.1.0, Quantech ATZ S.A., Barcelona, Spain.
- [2] Flores F.G. and Oñate E. (2001) “A basic shell triangle with only translational DOFs for large strain plasticity”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 50.
- [3] Flores F. (2001) “Elementos Finitos para el Análisis de Sólidos Anisotrópicos con Grandes Deformaciones Plásticas”, *Anales del Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF XII, Mecánica Computacional*, Córdoba, Argentina.
- [4] Flores F. (1999) “Un Algoritmo de Contacto para el Análisis de Procesos de Embutición”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- [5] [www.cti.cl](http://www.cti.cl)
- [6] García C., Celentano D. y Ponthot J.P. (2003) “Caracterización del comportamiento mecánico de aceros para embutición profunda”, enviado a las Jornadas SAM-CONAMET-2003, Bariloche, Argentina.
- [7] Groover M. (1997) *Fundamentos de manufactura moderna, materiales procesos y sistemas*, Tercera edición, Editorial Pearson, 1997.
- [8] López Navarro T. (1969) *Troquelado y estampación: con aplicaciones al punzonado, doblado, embutición y extrusión*. Editorial Gustavo Gili, Barcelona 1969.