

Evaluación del proceso de embutición de copas mediante parámetros de redondez y de cilindridad

M.C. Manjabacas, A. Martínez, J. Coello, V. Miguel, E. Elbal, A. Calatayud

Instituto de Desarrollo Regional; Escuela de Ingenieros Industriales UCLM
Mcarman.manjabacas@uclm.es

Resumen

El éxito del proceso de embutición de chapa está sujeto a evitar diversa defectología imputable al proceso, al material procesado y a las herramientas o dispositivo empleados. Uno de los problemas que suele presentarse es la recuperación elástica del material o spring-back. Dicho fenómeno supone el cambio de dimensiones del elemento embutido o estampado que debe ser prevista en el diseño de matrices o minimizado, cuestión ésta que no resulta fácil ya que éste depende de diversos factores como son las características plásticas del material, radios de doblado, dimensiones y forma del elemento, entre otros. En el presente trabajo se propone un método para la evaluación del spring-back mediante la medición de copas embutidas en un banco de redondez. Para evaluar la bondad del método, se evalúa la relación existente entre las magnitud medida, o diferencia entre magnitudes si se trata de valoración por comparación, con la incertidumbre del método de medida. Se aplica a la valoración de la recuperación elástica en copas embutidas de dos diámetros de acero DC-05 y de acero inoxidable AISI 304. Finalmente se aplica el método al análisis de la influencia de la anisotropía del material. Los resultados obtenidos son satisfactorios y permiten asegurar que la medición de la redondez y de la cilindridad de elementos embutidos para la evaluación de la defectología de productos embutidos axisimétricos y elaborar hipótesis de minimización y de previsión del fenómeno del spring-back.

INTRODUCCIÓN

El proceso de embutición profunda de piezas está sujeto defectologías que afectan la puesta en servicio de la pieza embutida. El origen de los defectos encontrados se debe a causas diversas. Existen defectos que inutilizan completamente la pieza, como son el arrugado y el desgarrar o rotura de la misma. Para unas condiciones dadas, y dentro del margen de fuerzas de cierre en el prensachapas para el que no se evita el arrugado, mayores fuerzas conducen a mayor número de arrugas con una longitud de onda menor [1]. A veces no se llega a producir el arrugado, pero hay tendencia a la inestabilidad produciéndose la ondulación del flanco o buckling). Un fenómeno de inestabilidad, que ha recibido una menor atención en las investigaciones es la ondulación de la chapa, pero en la zona de pared (puckering) [2]. Otros defectos afectan a la forma y/o dimensiones del producto fabricado como por ejemplo los debidos al desgaste de las matrices de estampación o a la recuperación elástica o spring-back. Este último fenómeno es objeto de numerosas investigaciones, tanto en el ámbito experimental como en la faceta numérica. Entre las variables que afectan al spring-back, están las debidas a la geometría de la matriz [3], a las condiciones de embutición como son fuerza de cierre en el prensachapas y condiciones de lubricación [4] y a indicadores intrínsecos del material como son el índice de anisotropía y el de endurecimiento [5]. En el terreno experimental, generalmente los trabajos van dirigidos a modelos simplificados consistentes generalmente en el estudio de las variaciones que experimenta una tira de chapa respecto a parámetros definidos de naturaleza geométrica y adimensionales antes y después de experimentar deformaciones con mayor o menor grado de analogía a las de carácter multiaxial que tienen lugar en los procesos de estampación [3, 6-8].

En el presente trabajo se propone la medida de redondez y de cilindridad en copas embutidas como método para evaluar de manera experimental la forma de dichos elementos y las variaciones que ésta experimenta respecto de las matrices y punzones empleados para su conformado. También se evalúa la influencia de la anisotropía del material y del coeficiente de endurecimiento en la recuperación elástica del producto embutido. Para ello, se experimenta con un acero DC-05 y un acero AISI 304 de calidad de embutición. Finalmente, se

establece la bondad del método para la evaluación experimental del springback en copas embutidas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Dispositivo experimental de embutición

Se ha procedido a embutir copas mediante un dispositivo experimental formado por un conjunto guía-plataformas para alojar el punzón, el prensachapas y la matriz de embutición (Fig.1). El dispositivo es conectado a un sistema de fuerza hidráulico que es convenientemente controlado. Dicho sistema se emplea para accionar el prensachapas.

El dispositivo es alojado en una máquina de tracción universal que actúa como prensa para el accionamiento del punzón. La fuerza aplicada en el punzón, así como la carrera del mismo, son medidas mediante el dispositivo de control de la máquina.

Las matrices y punzones empleados se indican a continuación (Tabla 1). Se han embutido copas de dos diámetros diferentes, respetando los valores recomendados en relación al juego existente entre punzón y matriz [9]. Dichos elementos son de acero F1552 templado y revenido con una dureza de 68 HRC.

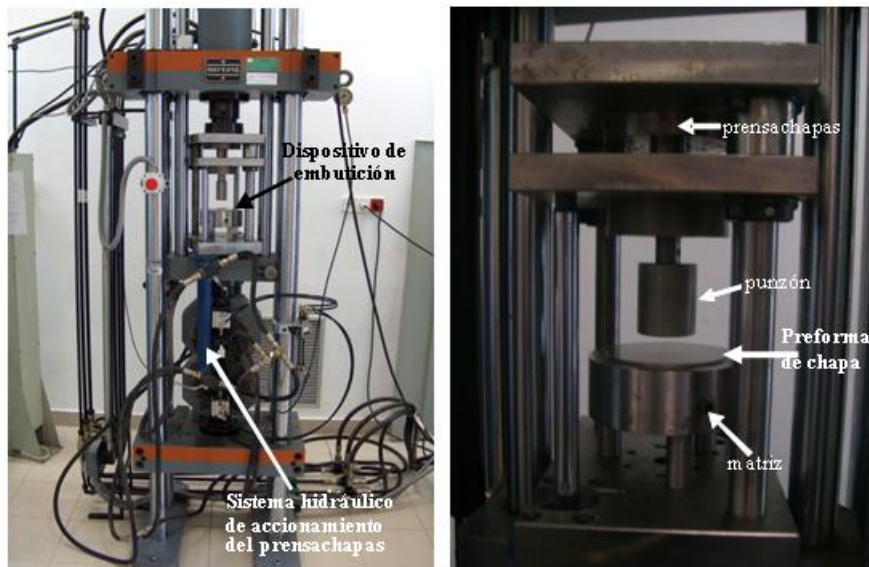


Fig.1. Dispositivo de embutición. a. Dispositivo general. b. Detalle.

Tabla 1. Dimensiones de las matrices y punzones empleados.

MATRIZ	Diámetro (mm)	PUNZÓN	Diámetro (mm)	JUEGO (mm)
M1	59,75	P7	58	1,75
M3	29,66	P3	28	1,66

Materiales empleados

Los materiales embutidos corresponden a chapa de 0,8 mm de espesor de acero DC-05 y de acero inoxidable austenítico AISI 304 de calidad de embutición. Para la embutición se cortaron discos de manera mecánica al diámetro establecido, procediendo al rectificado manual del borde cortado y al lijado fino de la superficie de corte. Para establecer el diámetro final con el que quedaba el disco de partida, se midieron tres diámetros mediante pie de rey con apreciación 0,01mm y se consideró el valor medio de las tres lecturas efectuadas.

Se marcó la dirección de laminación en el disco para que se pudiera identificar y se fijó dicha dirección respecto

del dispositivo de embutición con el fin de fijar la posición relativa de todos los elementos durante el proceso de embutición. Los discos fueron lubricados con aceite mineral de baja viscosidad, típico de aplicaciones “prelube” para evitar la oxidación. Para minimizar el rozamiento en la zona del flanco, es decir, bajo el prensachapas, se limitó el alcance en el cierre de este último fijando un hueco entre el prensachapas y la matriz igual al espesor de la chapa a embutir.

Evaluación de la cilindridad

La medición de copas se llevó a cabo mediante un banco de redondez Talyrond 131C de Taylor Hobson Inc, con las características metrológicas que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Características metrológicas del banco de redondez.

Error de rectitud de la columna	$< 3\mu\text{m}/225\text{mm}$
Error de paralelismo (en el plano de medida)	$< 3\mu\text{m}/225\text{mm}$
Incertidumbre de posicionamiento del palpador	$\pm 250\mu\text{m}$
Error límite axial (desplazamiento de la columna)	$0,025\mu\text{m}$
Error máximo de redondez	$\pm(0,025\mu\text{m} + \frac{0,00025\mu\text{m}}{\text{mm}})$
Resolución (en el rango de ensayo)	$0,03\mu\text{m}$

En la Fig.2 se establece un esquema del dispositivo de medición en el que se indican las características metrológicas especificadas en la Tabla 2.

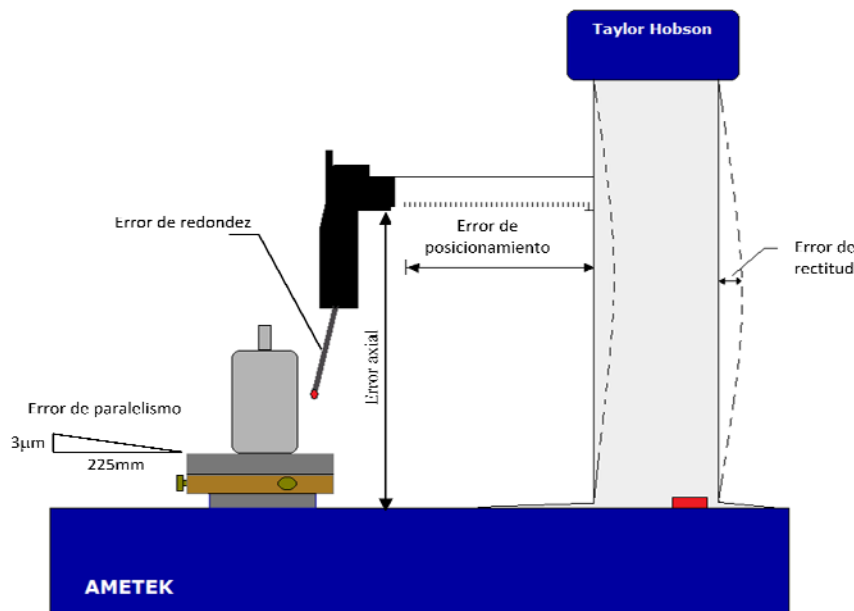


Fig. 2. Banco de redondez y definición de las especificaciones metrológicas asociadas.

El error de posicionamiento no afecta a la cilindridad porque el palpador, una vez posicionado, sólo es desplazado a lo largo de la columna. El error axial se refiere al posicionamiento del palpador respecto de la columna. Este error tampoco afecta estrictamente a las mediciones de redondez. Afecta únicamente a la definición del plano en el que se evalúa la redondez.

Por tanto, desde el punto de vista de la cilindridad se consideran relevantes el error de redondez, ϵ_R , el error de

paralelismo, ϵ_p , el error de rectitud, ϵ_r , y la repetibilidad del instrumento de medida. El error de paralelismo se traduce en un error de longitud máximo, ϵ_{lp} , que afecta a la redondez conforme a la "Ec (1)". Dada la magnitud del mismo, se ha considerado despreciable.

$$\epsilon_{lp} = \sqrt{(225 \cdot 10^3 + 3^2)} - 225 \cdot 10^3 = 2 \cdot 10^{-5} \mu\text{m} \quad (1)$$

De este modo, el error máximo atribuible al instrumento de medición se puede componer a partir del error de redondez, el error de rectitud, la resolución, E, y la repetibilidad del instrumento. Para determinar la repetibilidad del banco, se ha efectuado un ensayo de redondez sobre las propias piezas a medir, determinando la máxima desviación típica, S, para 15 medidas. De este modo, se atribuye la misma repetibilidad para las lecturas efectuadas con el instrumento. Igualando los errores a incertidumbres y sumando éstas de forma cuadrática, se obtiene la expresión para la incertidumbre típica de medición, I_M , para una lectura, que se establece en la "Ec (2)", en la que H representa la máxima altura absoluta alcanzada en la columna.

$$U_M^2 = \epsilon_R^2 + (\epsilon_r \cdot H)^2 + \frac{S^2}{15} + \frac{S^2}{1} + \frac{E^2}{12}$$

La contribución de la redondez, ϵ_R , como consecuencia del movimiento propio del palpador, depende del radio del elemento a evaluar. Del mismo modo, la contribución del error de rectitud, depende de la definición del plano de medida. Considerando los valores máximos establecidos para los elementos a evaluar en el presente trabajo, y teniendo en cuenta la "Ec. (2)", se obtiene una incertidumbre típica máxima, U_M , de valor $0,308 \mu\text{m}$. Es de destacar, que la incertidumbre se ve fuertemente afectada por el valor alcanzado en la columna, esto es, por la máxima altura de definición del plano en el que se mide la redondez y por tanto, en términos comparativos, no debe tenerse en cuenta para elementos diferentes medidos en los mismos planos.

Para el caso de evaluar comparativamente elementos diferentes en los mismos planos, en cambio sí que hay que tener en consideración la incertidumbre de posicionamiento del palpador, cuyo valor es del mismo orden de magnitud, aunque algo inferior al máximo error de rectitud. Por tanto, se considera que la máxima incertidumbre típica es $0,308 \mu\text{m}$ como límite superior en todos los ensayos realizados.

Si expresamos el valor de incertidumbre para $k=2$, entonces la incertidumbre de medición valdría lo que se indica en la "Ec (3)".

$$I_M = 2 \cdot U_M = 0,62 \mu\text{m} \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Registros y parámetros de redondez y cilindricidad.

En la Fig. 3 se muestra un típico diagrama polar en el que se establecen los parámetros de redondez correspondientes al plano de medición conforme a la norma ISO 12181-1.

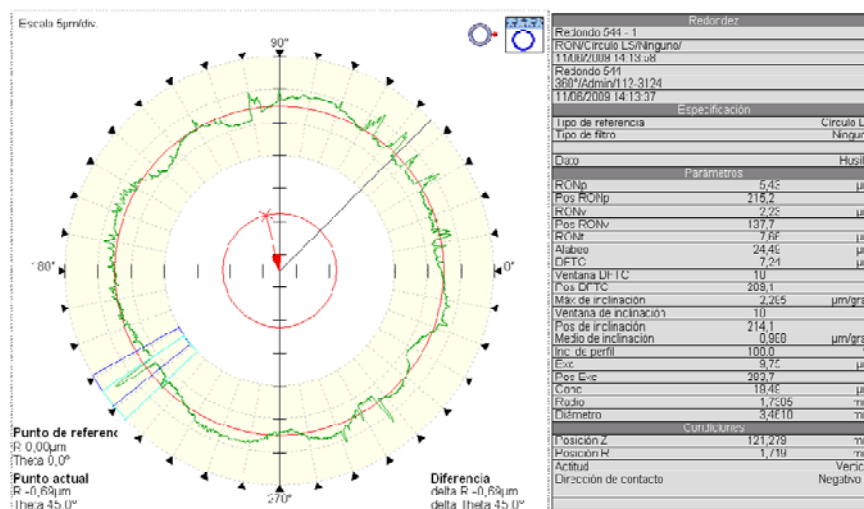


Fig.3 Parámetros de redondez típicos para un plano de medición conforme a ISO 12181-1.

En la Fig.4 se establece el diagrama correspondiente a los parámetros de cilindridad correspondientes a la copa embutida DC30 (Tabla 4). Como puede observarse, la forma del perfil medido indica claramente la defectología de forma existente en el producto conformado.

El parámetro que va a ser considerado a continuación es el radio medio en cada plano para analizar comparativamente la recuperación elástica o spring-back para los dos materiales ensayados conforme a los procesos de embutición que se detallan en la Tabla 3 y cuyos resultados se indican en las Fig. 5 a 7 y Fig. 9.

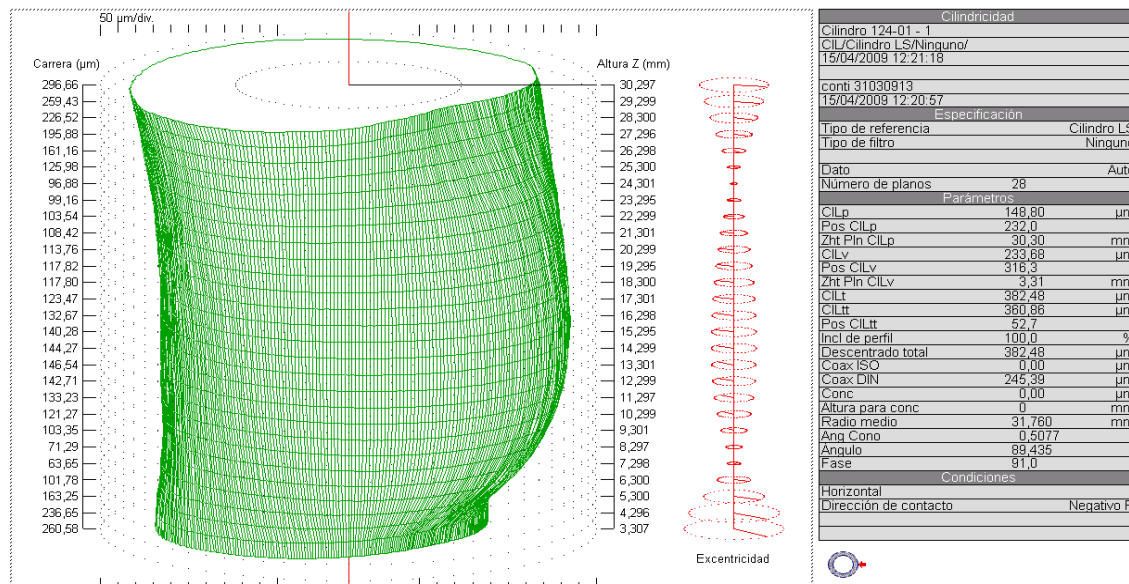


Fig.4. Diagrama típico de cilindridad con los parámetros correspondientes a ISO 12181-1.

Para evaluar la forma experimentada por la copa embutida, resulta muy interesante establecer comparativamente el valor del radio medio para el sistema punzón-matriz empleado. En la Fig. 5 se representan las dimensiones obtenidas para las copas DC30 e Inox30. Como puede observarse, las dimensiones del producto embutido se ajustan más a las dimensiones de la matriz que a las del punzón ya que el radio exterior de la copa es mayor que el valor del radio del punzón más el espesor de la chapa. También se observa que, a pesar de que las dimensiones del punzón y de la matriz son constantes en toda su longitud, el radio de la copa se incrementa respecto del fondo de la misma con tendencia a ser constante a partir de un plano determinado. En el caso del acero inoxidable, la recuperación elástica del material hace, incluso, que el radio externo de la copa supere el radio interno de la matriz

Tabla 3. Definición del proceso de embutición de copas

	Material	Punzón	Matriz	Radio disco de partida (mm)	Radio exterior copa (mm)	Relación embutición
DC30.1	DC-05	P7	M1	52	29,318	1,76
Inox30.1	AISI 304DDQ	P7	M1	52	29,811	1,76
DC15.1	DC-05	P3	M3	21	14,783	1,46
Inox15.1	AISI 304DDQ	P3	M3	21	14,815	1,46

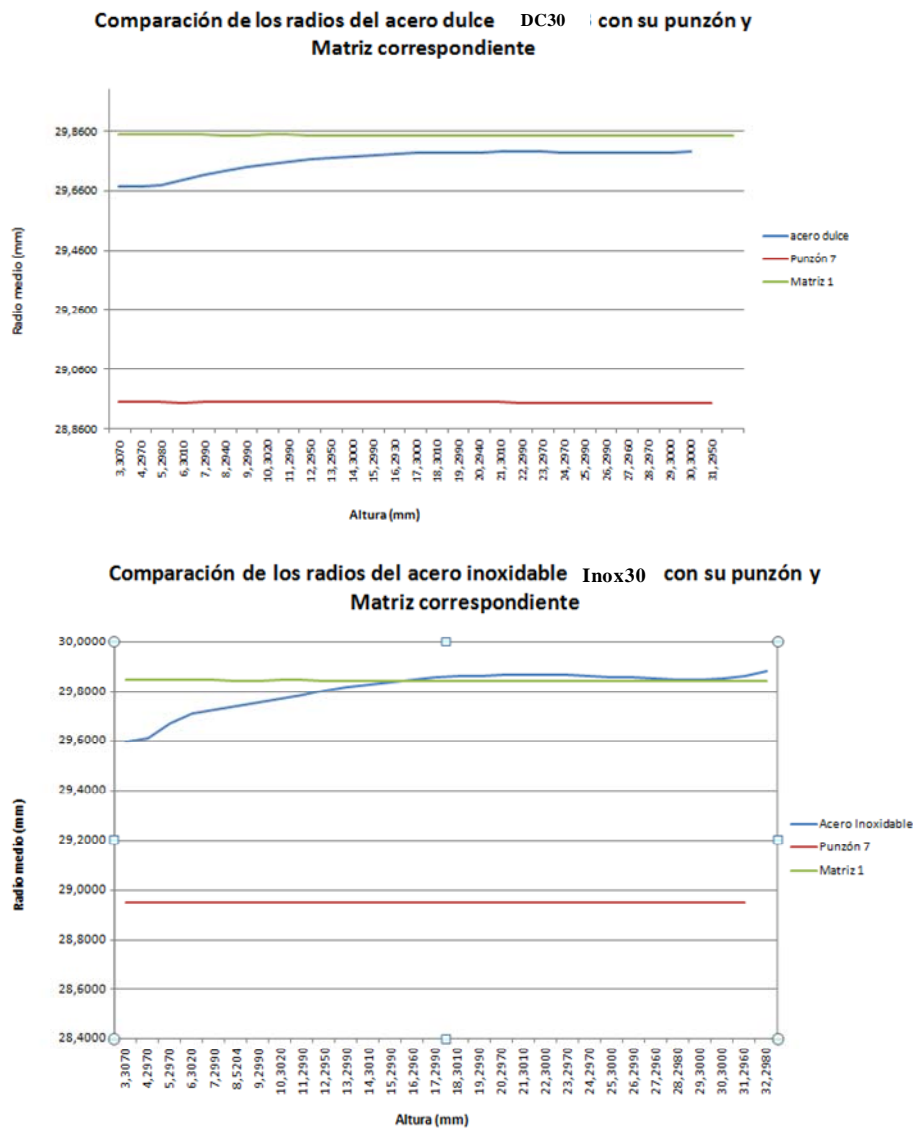


Fig. 5. Radio medio para copas embutidas de acero DC-05 y AISI 304 en función de las dimensiones del punzón y de la matriz de embutición.

En la Fig. 6 se destaca la mayor recuperación elástica del acero inoxidable respecto del acero DC-05, resultado esperado si se tiene en cuenta el mayor índice de endurecimiento de aquél. También se observa la influencia del radio del producto embutido. Efectivamente, al comparar las Fig. 6a y 6b se aprecia que la diferencia en la recuperación relativa de ambos aceros es mayor en las copas de menor diámetro, a pesar de que la relación de embutición es menor en este último caso. El orden de magnitud de la dimensión evaluada como diferencia en la recuperación, es de $70\mu\text{m}$, lo que supone 100 veces el valor de la incertidumbre atribuible al banco de redondez.

También es de destacar de modo general que la recuperación elástica tiende a ser mayor hacia la parte superior de la copa embutida, lo que contrasta con los resultados obtenidos por otros autores [10], mediante otros procedimientos y dimensiones. El resultado obtenido en este trabajo es coherente si se tiene en cuenta que el fondo de la copa rigidiza la zona, permitiendo menos deformación que en la parte superior. En la parte superior, aunque existe una parte de ala, que corresponde al radio de la matriz de embutición, el efecto rigidizador se considera menor. En cualquier caso, se ha evaluado el efecto rigidizador del extremo de las copas mediante la medición de la redondez cortando la zona del extremo. En la Fig. 7, la copa señalada como "a" conserva una pequeña zona de ala en el extremo en la que se observa el radio de la matriz. La copa señalada como "c" corresponde a una copa en la que se ha eliminado dicho extremo. Como puede observarse en la Fig. 9, la eliminación del extremo superior conduce a una recuperación elástica mayor, lo que confirma la indicación dada

anteriormente. También se puede establecer que el efecto se traslada prácticamente hasta el fondo de la copa ya que las dimensiones obtenidas para esta zona también aumentan. La diferencia de dimensiones es del orden de los $200\mu\text{m}$, que comparada con la incertidumbre atribuida al instrumento de medición, justifica el empleo del mismo.

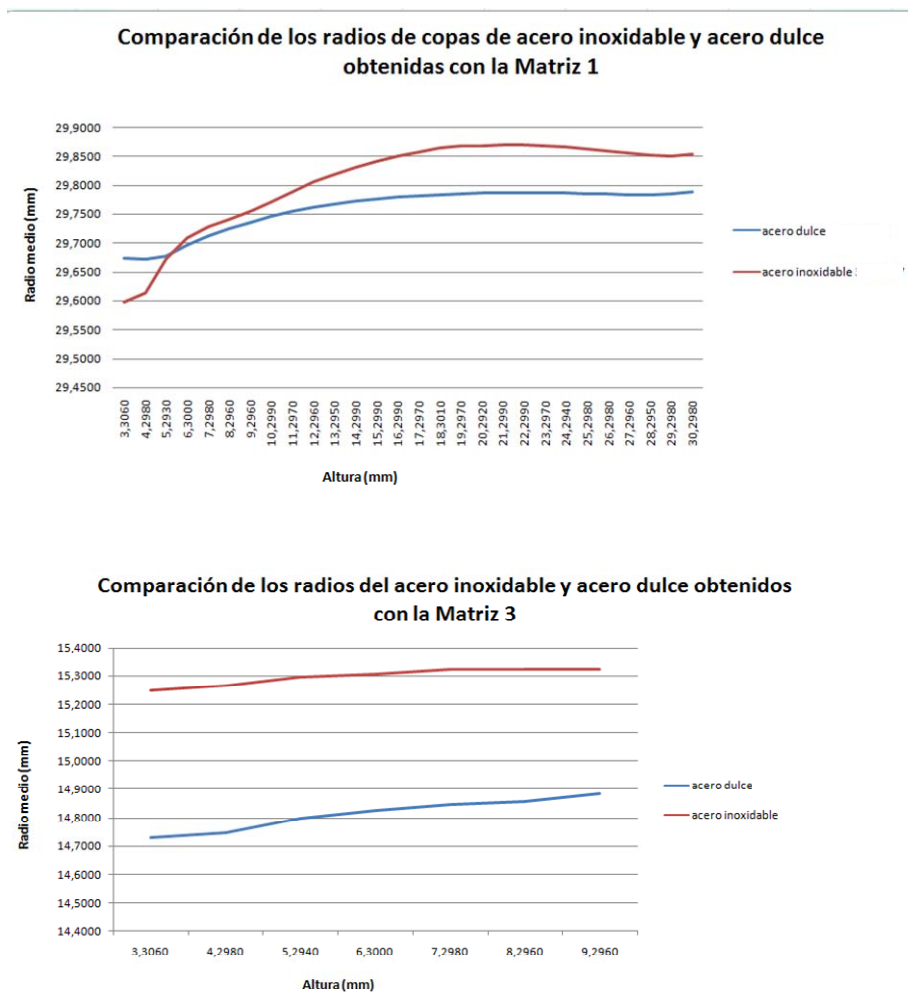


Fig. 6. Análisis comparativo del radio medio en distintos planos del eje axial de la copa, para acero DC-05 y AISI 304 y para dos diámetros diferentes.

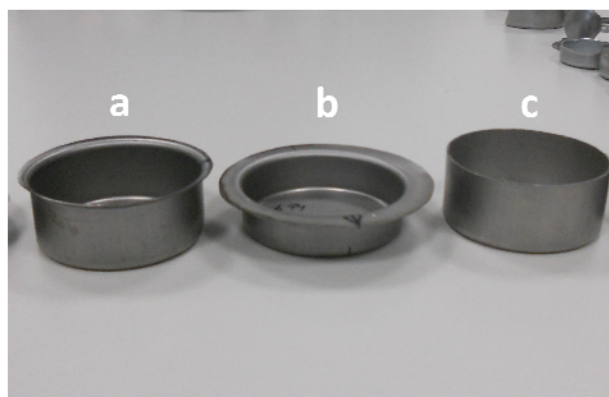


Fig. 7. Detalle del extremo debido al radio de acuerdo de la cavidad de la matriz (copa a) y del corte del mismo (copa c). La copa b representa un elemento con parte de flanco, aunque no ha sido considerado en el análisis.

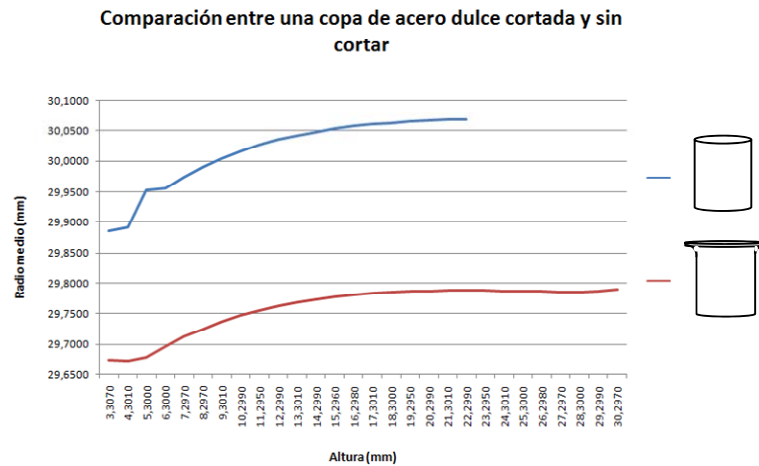


Fig.8. Análisis del spring-back tras el corte del ala existente en el producto embutido.

Otro aspecto importante en la estampación de chapa es la influencia de la dirección de laminación en la forma del producto embutido. En la Fig. 9 se representan la distancia desde el centro de la copa hasta su superficie exterior en tres direcciones respecto de la de laminación de la chapa. Aunque para establecer resultados concluyentes se requiere un estudio más pormenorizado de la variable considerada, se observan que existen ligeras diferencias en las dimensiones del radio de la copa en función de la dirección considerada, respecto de la de laminación de la chapa. Por tanto, se demuestra la posibilidad de emplear el método para investigar este aspecto.

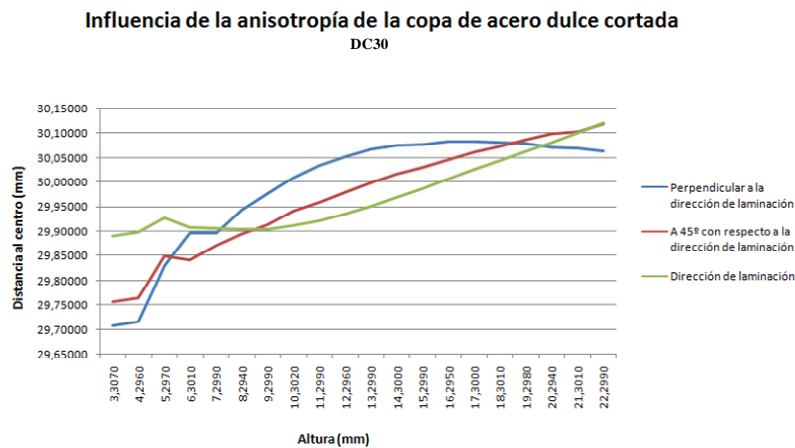


Fig.9. Radio medio en función de la dirección de laminación de la chapa para acero DC-05.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha demostrado la posibilidad de evaluar defectología imputable a los procesos de embutición de chapa mediante la medición de los parámetros de redondez y de cilindricidad a copas embutidas de aceros diferentes. Se ha justificado la bondad del método en función de la relación existente entre la magnitud a medir y la incertidumbre del método. Como aplicación se ha establecido la recuperación elástica del material en relación a las dimensiones del punzón, de la matriz y del material considerados. Los resultados obtenidos son perfectamente justificables en el ámbito de la tecnología de materiales.

REFERENCIAS

- [1] Kim, J.B., Yoon, J.W., Yang, D.Y., "Investigation into de wrinkling behaviour of thin sheets in the cylindrical cup deep drawing process using bifurcation theory", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 56, pp.1673-1705.
- [2] M. Donoghue, R. Stevenson, Y.J. Kwon, N. Triantafyllidis, "An experimental Verification of the Hemispherical Cup Puckering Problem", Journal of Eng. Mat. Tech., 1989, Vol 11, pp. 248-254.

- [3] J. Coello, investigación de las transformaciones microestructurales y del comportamiento tribológico del acero inoxidable austenítico AISI 304 DDQ sometido a deformaciones con tensiones multiaxiales específicas del proceso de embutición profunda, Tesis Doctoral, UP Valencia, Valencia 2009.
- [4] I. Ragai, D. Lazim, J.A. Nemes. "Anisotropy and springback in drawbending of stainless steel 410: experimental and numerical study". J. of Mat. Proces. Tech., Vol 166, (1), 2005, pp. 116-127.
- [5] D. Leu. "A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals". J. of Mat. Proces.Tech., Vol 66, (1-3), 1997, pp. 9-17.
- [6] W. D. Carden, L. M. Geng, D. K. Matlock, R. H. Wagoner. "Measurement of springback". Int. J. Mech. Sciences, Vol 44 (1) 2002, pp. 79-101.
- [7] J. F. Wang, R. H. Wagoner, W. D. Carden, D. K. Matlock, F. Barlat. "Creep and anelasticity in the springback of aluminium". Int. J. Plasticity, Vol 20 (12), 2004, pp. 2209-2232.
- [8] J.F. Wang, R.H. Wagoner, D.K. Matlock, F. Barlat. "Anticlastic curvature in draw-bend springback". Int. J. Sol. Struct., Vol 42 (5-6), 2005, pp. 1287-1307.
- [9] Kalpakjian, S.; Schmid, S.R., Manufacturing Processes for Engineering Materials, Ed. Pearson Prentice-Hall, (2008).
- [10] T. Gnaeupel-Herold, T. Foecke , H. J. Prask , R. J. Fields, An investigation of springback stresses in AISI-1010 deep drawn cups, Mat. Sc. Eng. A 399 (2005) 26-32.