

ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LAS TENSIONES RESIDUALES GENERADAS POR PROCESO DE DEEP ROLLING

J.M. Alegre^{1*}, A. Díaz¹, I.I. Cuesta¹

¹Grupo de Integridad Estructural, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos

Av. Cantabria s/n, 09006, Burgos, España

*Persona de contacto: jalegre@ubu.es

RESUMEN

El Deep Rolling es un proceso relativamente económico para el tratamiento superficial de piezas metálicas que logra un doble objetivo: por un lado, mejora el acabado superficial de la pieza y, por otro lado, introduce en la superficie tensiones residuales de compresión que aumentan la vida en fatiga del componente. El estado tensional generado depende de numerosos factores, entre los que se incluyen el comportamiento del material base, el diámetro y la presión de contacto de la bola, o la separación entre pasadas utilizada para abarcar la superficie a tratar. En este trabajo, la medida experimental de las tensiones residuales generadas se ha efectuado utilizando la técnica del *hole drilling*. Se describe el procedimiento numérico para obtener las tensiones residuales a partir de las deformaciones obtenidas experimentalmente mediante una roseta de galgas extensiométricas. Asimismo, el estudio efectuado cubre un amplio rango de presiones de contacto y de la distancia entre pasadas, lo que permite extraer importantes conclusiones acerca de la optimización del proceso.

PALABRAS CLAVE: Tensiones residuales, Deep-rolling, Hole-drilling

ABSTRACT

Deep Rolling is a relatively economic mechanical process used for the surface treatment of metallic parts, which accomplishes to a two-fold benefit: on the one hand, to achieve a high-quality surface finish, and on the other hand, to introduce high compressive residual stresses in a thin surface layer that increase the fatigue life of the component. The compressive residual stress level depends on many factors, such as the material behavior, pressure force on the ball, diameter of the ball, or the gap between parallel paths used to cover the workpiece surface. In this work, compressive residual stresses have been experimentally measured using the hole-drilling method. A numerical procedure is described with the objective of finding a residual stress distribution from the experimentally registered deformation using a strain gauge rosette. Moreover, a wide range of compressive forces on the ball and different gaps between paths have been covered in this study, which allows for important conclusions about the optimization of the deep-rolling process to be drawn.

KEYWORDS: Residual stress, Deep-rolling, Hole-drilling

1. INTRODUCCIÓN

El Deep Rolling (DR) es un proceso mecánico relativamente sencillo que consiste hacer rodar sobre la superficie del material una esfera cerámica, con una determinada presión de contacto, de tal forma que se plastifica localmente la superficie del componente. Una vez que la bola sobrepasa la zona de proceso, la recuperación elástica del contorno genera un camino con elevadas tensiones residuales de compresión, que suelen alcanzar profundidades en torno a 1-2 mm.

Mediante esta técnica se consigue un doble objetivo: por un lado se generan tensiones residuales de compresión

en la capa superficial, y por otro, se produce un aplastamiento de las crestas superficiales, reduciendo la rugosidad superficial y mejorando el acabado de la misma. Ambos efectos contribuyen de manera importante a mejorar la resistencia a fatiga de la pieza, incrementando considerablemente la vida en fatiga del componente.

Tanto el acabado superficial conseguido, como la profundidad de la capa con tensiones residuales hacen que sea una técnica más interesante que otras alternativas como el *shot peening*, mediante la cual se llega a profundidades en torno a 200 micras y con peores acabados superficiales.

Además, el equipamiento necesario para la aplicación de esta técnica es más económico que el requerido para el *shot peening*. Por el contrario, las zonas a las que se puede acceder son más limitadas, aunque el diseño de nuevas herramientas está experimentando un gran avance. Las herramientas de Deep Rolling pueden ser conectadas directamente a máquinas (convencionales o controladas por control numérico, CNC), y puede integrarse en el propio proceso de fabricación de la pieza (Figura 1).

La aplicación de la presión sobre la bola se efectúa mediante una bomba hidráulica conectada al interior de la herramienta, donde el fluido es mezclado con el refrigerante, y actúa sobre la propia bola. Unos canales de drenaje y el propio giro libre de la bola se encargan de la lubricación de la zona de contacto y de reducir el rozamiento entre la pieza y la bola.

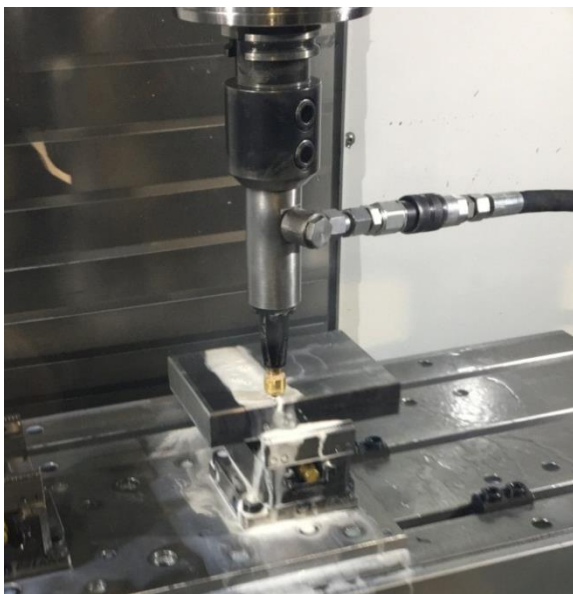
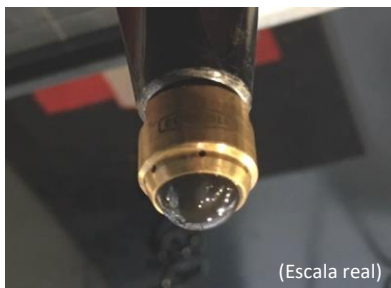


Figura 1. Herramienta de Deep-Rolling acoplada a un equipo CNC.

Uno de los principales retos en la aplicación de esta técnica consiste en conocer, de manera adecuada, las tensiones residuales generadas en la pieza para unas determinadas condiciones de ejecución. En dicho proceso intervienen varios factores, como el propio comportamiento del material, el diámetro de la bola, la presión de contacto o la distancia entre pasadas.

En este trabajo se presenta un estudio numérico-experimental, de las tensiones residuales generadas en una placa de acero de media resistencia, mediante el proceso de Deep Rolling. Se analiza el efecto de la presión de contacto y de la distancia entre pasadas, tanto en las tensiones residuales obtenidas, como en la rugosidad y afectación de la superficie de la pieza.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material

El material seleccionado ha sido un acero AISI 1045, también denominado UNE-F114 o DIN-CK45, cuyo contenido en carbono está entre 0.42 y 0.50 %. En condiciones normalizadas, está formado principalmente por ferrita (35 %) y por perlita (65 %) [1]. El acero escogido ha sido caracterizado en un ensayo de compresión uniaxial. En las curvas obtenidas, puede observarse un comportamiento claramente bilineal donde los parámetros elasto-plásticos han sido ajustados son: módulo de Young $E = 196\ 000$ MPa; límite elástico $\sigma_{ys} = 300$ MPa y pendiente tras límite elástico $E_T = 7000$ MPa.

2.2. El proceso del Deep Rolling

Para el estudio considerado se ha efectuado el proceso de Deep Rolling sobre placa plana de gran espesor de acero AISI 1045, utilizando una bola cerámica de 13 mm de diámetro. Las pasadas se efectuaron en forma lineal (ida y vuelta), cubriendo toda la superficie mediante sucesivas pasadas separadas una distancia a , tal y como se esquematiza en la Figura 2.

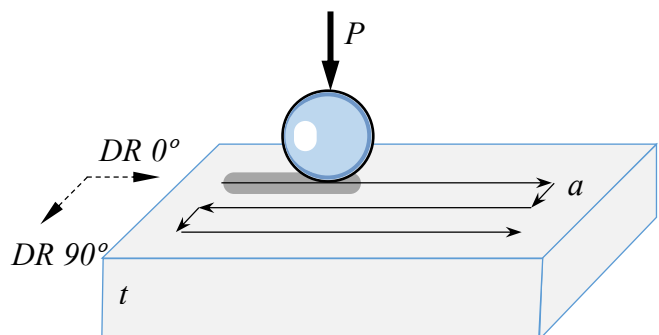


Figura 2. Esquema para cubrir la superficie mediante el proceso de Deep Rolling en una placa.

Se han procesado dos placas de superficie 130 x 100 mm y espesor $t = 25$ mm. En cada placa se han generado tres bandas de dimensiones 20x100mm con presiones sobre la bola de $p = 100, 200$ y 300 bares respectivamente. Los avances utilizados en las placas han sido de 0.05 mm y 0.15 mm respectivamente. De esta forma se dispone de las 6 situaciones diferentes recogidas en la Tabla 1. Los valores utilizados son los

habituales para conseguir buenos acabados superficiales con esta técnica.

Tabla 1. Variables utilizadas en el proceso de Deep Rolling estudiado en este trabajo.

Denominación de la banda	Placa	P (bar)	a (mm)
#1-100-0.05	#1	100	0.05
#1-200-0.05	#1	200	0.05
#1-300-0.05	#1	300	0.05
#2-100-0.15	#2	100	0.15
#2-200-0.15	#2	200	0.15
#2-300-0.15	#2	300	0.15

3. MEDIDA EXPERIMENTAL DE LAS TENSIONES RESIDUALES

La tensión no es una magnitud medible directamente sino que se deben medir las deformaciones que produce y luego establecer la relación entre ambas. Básicamente, el Hole Drilling consiste en realizar un agujero en la superficie de la probeta a ensayar, medir las deformaciones que se producen en el material alrededor de dicho agujero y finalmente calcular las correspondientes tensiones residuales.

3.1. Perforación de la superficie

El equipo empleado en este trabajo ha sido el modelo RESTAN MTS3000 [2], totalmente automatizado y con las siguientes características:

- Velocidad de perforación: 400 000 rpm.
- Velocidad de avance: 0.2 mm/minuto
- Punta de taladro: cono invertido fabricado de carburo de tungsteno.

El alineamiento del taladro en el centro exacto de la roseta es fundamental ya que una pequeña excentricidad provoca grandes errores en el cálculo de las tensiones residuales. Para ello, el equipo empleado consta de un microscopio acoplado que permite centrar la punta del taladro con precisión de centésimas de milímetro.

Además, con la turbina de alta velocidad de rotación se evita la introducción de tensiones adicionales durante el taladrado. Con la punta de taladro empleada, el agujero tiene un diámetro de 1.6 mm. En todas las muestras se ha taladrado hasta una profundidad de 2 mm midiendo las tensiones residuales en 40 pasos con distribución polinómica.

3.2. Medición de las deformaciones

Para medir las tensiones que se liberan al realizar la perforación existen diversas técnicas aunque las más

empleadas son dos: las galgas extensiométricas y métodos ópticos (DIC o interferometría). Sin embargo, debido a su sencillez y estandarización, el método del Hole Drilling, incluido este trabajo, suele referirse al uso de rosetas de galgas.

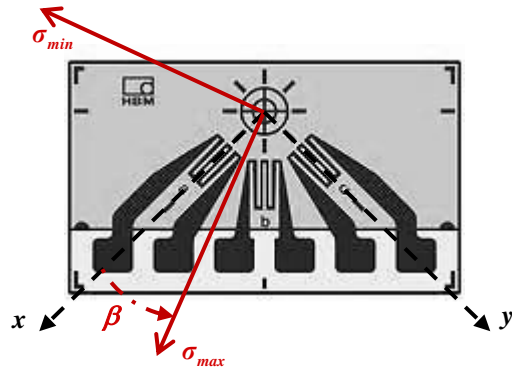


Figura 3. Convenio utilizado para definir σ_{min} , σ_{max} y β respecto a las galgas a, b y c.

La roseta de galgas empleada en este trabajo es un modelo HBM RY61R diseñada especialmente para la técnica del Hole Drilling. Está formada por dos galgas a 90° y una tercera a 45° de cada una de las anteriores, estado las tres el mismo cuadrante del plano. En este caso, el convenio adoptado es el mostrado en la Figura 3, con las galgas a, b y c en sentido anti-horario, correspondiendo la galga a con el eje x y la galga c con el eje y. Cuando se mencione la tensión máxima y mínima, su dirección se definirá por el ángulo β que forma la máxima con la galga a. Las rosetas han sido posicionadas de tal forma que la galga b coincide con la dirección DR 0° (Figura 2).

3.3. Cálculo de las tensiones residuales

La introducción de un agujero dentro de un material que posee tensiones residuales provoca la relajación de las tensiones en dicho lugar. Esto causa una deformación inmediata en la región que rodea al agujero. La deformación registrada a cada profundidad h_j corresponderá a una integral que tenga en cuenta las tensiones liberadas previamente [3]:

$$\varepsilon(h_j) = \varepsilon_j = \frac{1}{E} \int_0^{h_j} G_j(z) \sigma(z) dz \quad (1)$$

donde $G_j(z)$ son funciones que cuantifican el efecto de una tensión a profundidad z en las deformaciones registradas en superficie cuando se ha eliminado una capa de material h_j . La historia de deformaciones según se taladra, i.e. ε_j , es la medida experimental que ofrece la roseta de galgas mientras que la incógnita del problema es la distribución de tensiones en profundidad,

$\sigma(z)$. Por tanto, se trata de un problema inverso y se requieren estrategias numéricas para hallar las tensiones.

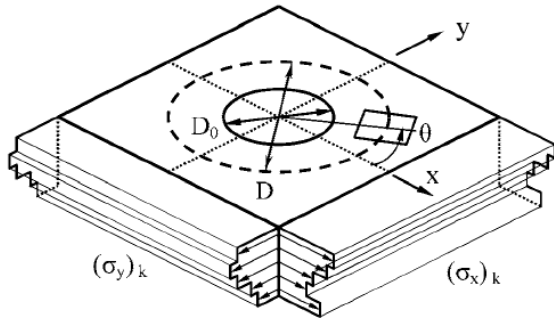


Figura 4. Esquema de la distribución de tensiones no uniforme [4].

Si se divide la profundidad a la que se evalúan las tensiones en incrementos, como se muestra en la Figura 4, la incógnita es el vector σ_k . Aunque existen muchos algoritmos, aquí se destacan dos métodos:

- ASTM E837-13a [4] para tensiones residuales no uniformes.
- Método HDM [5]. Desarrollado por la Universidad de Pisa y que a su vez se basa en el método Integral propuesto por Schajer.

La ventaja del cálculo ASTM E837-13a es evidentemente la estandarización del ensayo, mientras que su principal inconveniente es que se limita al análisis de 1 mm de profundidad. El método HDM, además de salvar este límite de profundidad, proporciona unos coeficientes optimizados y permite corregir los errores por excentricidad. La norma define tres deformaciones equivalentes a partir de las deformaciones en las galgas 1, 2 y 3 (aquí a , b y c) [4]:

$$p_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1) / 2 \quad (2)$$

$$q_j = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / 2 \quad (3)$$

$$t_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2) / 2 \quad (4)$$

Basándose en el método Integral [3] se considera la relación con unas tensiones P_k , Q_k y T_k :

$$p_j = \frac{1+\nu}{E} \sum_k \bar{a}_{jk} P_k \quad (5)$$

$$q_j = \frac{1}{E} \sum_k \bar{b}_{jk} Q_k \quad (6)$$

$$t_j = \frac{1}{E} \sum_k \bar{b}_{jk} T_k \quad (7)$$

Donde las matrices \bar{a}_{jk} y \bar{b}_{jk} aparecen tabuladas en la norma y son corregidas en función del diámetro del agujero, en este caso 1.6 mm. Una vez resuelto el sistema matricial, se despejarán las tensiones a partir de:

$$P_k = \frac{(\sigma_y)_k + (\sigma_x)_k}{2} \quad (8)$$

$$Q_k = \frac{(\sigma_y)_k - (\sigma_x)_k}{2} \quad (9)$$

$$T_k = (\tau_{xy})_k \quad (10)$$

Al tratarse de un problema inverso, los pequeños errores en la medida de deformaciones pueden amplificarse de manera incontrolada en los resultados de tensiones. Por esta razón, se suele aplicar la regularización de Tikhonov para minimizar los errores experimentales. Consiste en usar una matriz de regularización \mathbf{c} y unos coeficientes α . El sistema matricial quedaría para el cálculo de P_k :

$$\bar{\mathbf{a}}^T \mathbf{p} = \frac{1+\nu}{E} (\bar{\mathbf{a}}^T \bar{\mathbf{a}} + \alpha_p \mathbf{c}^T \mathbf{c}) \mathbf{P} \quad (11)$$

Y de manera análoga con los sistemas correspondientes al cálculo de Q_k y T_k .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Deformaciones obtenidas experimentalmente

Para todas las medidas, independientemente del paso o el espesor se repite la misma tendencia: la galga a y c miden deformaciones aproximadamente iguales y la galga b una deformación mucho menor, es decir, $\varepsilon_a \approx \varepsilon_c > \varepsilon_b$.

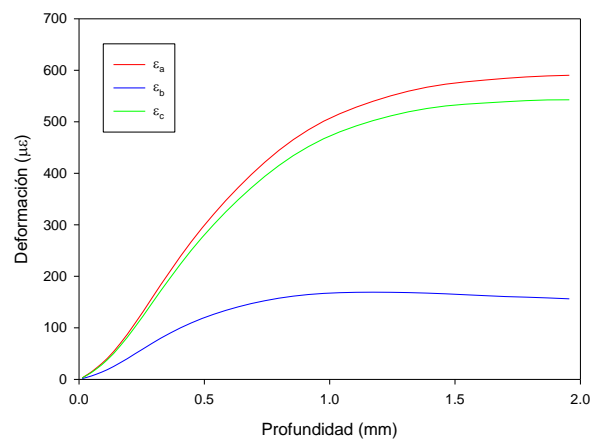


Figura 5. Medida de deformaciones para la banda #1-300-0.05 con $p = 300$ bar y $a = 0.05$ mm.

4.1. Tensiones calculadas

Siguiendo el algoritmo descrito, se hallan las tensiones σ_x , σ_y y τ_{xy} y además las tensiones principales máximas y mínimas. El ángulo β , definido como el ángulo entre la tensión máxima y el eje x es aproximadamente 45° para todas las profundidades lo que implica que la tensión máxima, en este caso la de menor compresión, se sitúa en la dirección de la galga, es decir, en la dirección longitudinal del Deep Rolling (DR 0° en la Figura 2). En la Figura 6 se representan las tensiones longitudinales (DR 0°) y las transversales (DR 90°) para una distancia entre pasadas de 0.15 mm mientras que los resultados para paso igual a 0.05 mm se muestran en la Figura 7.

La mayor compresión obtenida en la dirección perpendicular al Deep Rolling también fue observada por Rodríguez et al. [6]. Puede apreciarse una tendencia a la aparición de mayores tensiones residuales de compresión cuanto mayor es la presión aplicada, como cabría esperar. Sin embargo, la medida de presión igual a 300 bar y paso 0.05 mm no sigue ese patrón. Para confirmar ese efecto de la presión, en futuros trabajos será preciso un diseño de experimentos que permita un tratamiento estadístico y el análisis de la influencia de cada factor

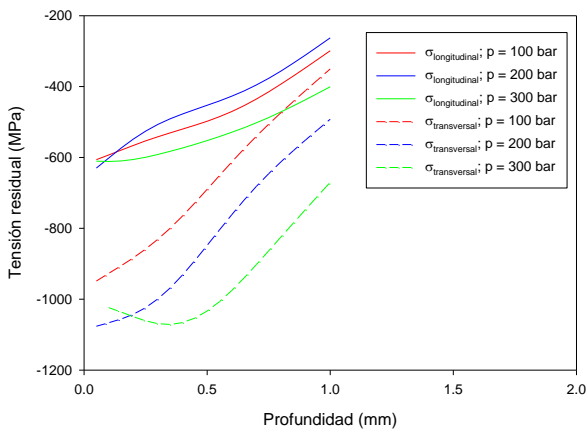


Figura 6. Tensiones residuales: paso = 0.15 mm.

En cuanto a la influencia del paso, no se distingue un efecto claro en las tensiones cerca de superficie, aunque se observa que un paso más corto (en este caso 0.05 mm) produce una distribución de compresiones más horizontal, es decir, que la profundidad alcanzada por el Deep Rolling es mayor.

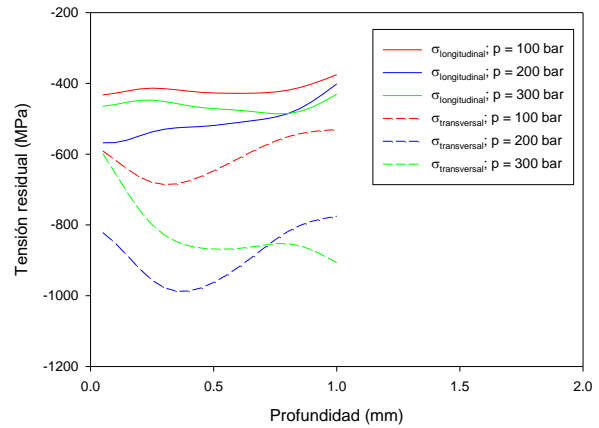


Figura 7. Tensiones residuales: paso = 0.05 mm.

En los resultados presentados en las Figuras 5, 6 y 7, los valores para α_p , α_Q y α_T se encuentran entre 0 y 10^{-3} y se han escogido tratando de guardar un equilibrio entre una suavidad de la distribución y la representatividad de las tensiones reales. En la Figura 8 puede apreciarse el cálculo de la tensión longitudinal y la transversal para la muestra #2-100-0.15 con la regularización de Tikhonov para distintos valores de esos coeficientes. Se observa cómo para α iguales a cero, i.e. sin regularización, las distribuciones son muy irregulares y presentan picos locales poco realistas. Sin embargo, para valores α grandes, la distribución tiene a ser una recta y deja de capturar la curvatura de las tensiones.

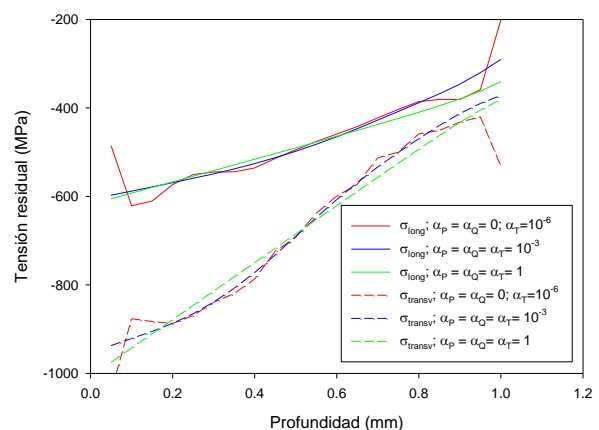


Figura 8. Efecto de la regularización de Tikhonov en la distribución de tensiones para $p = 100$ bar y $a = 0.15$ mm.

Una de las limitaciones de los cálculos realizados siguiendo la norma ASTM E837-13a es la profundidad de 1 mm. A fines ilustrativos, la Figura 9 representa los resultados de la muestra #2-100-0.15 calculados previamente en comparación con los hallados mediante el método HDM ya mencionado. El cálculo por el método HDM se ha realizado mediante el software EVAL7 [2]. La tendencia es similar aunque la optimización y la regularización no han sido tan controladas en los cálculos HDM. Este algoritmo más avanzado permite no obstante ver cómo la penetración del Deep Rolling se sitúa entre 1 y 1.5 mm de profundidad; a partir de ahí se demuestra que existe una zona traccionada para que se cumpla el equilibrio de tensiones.

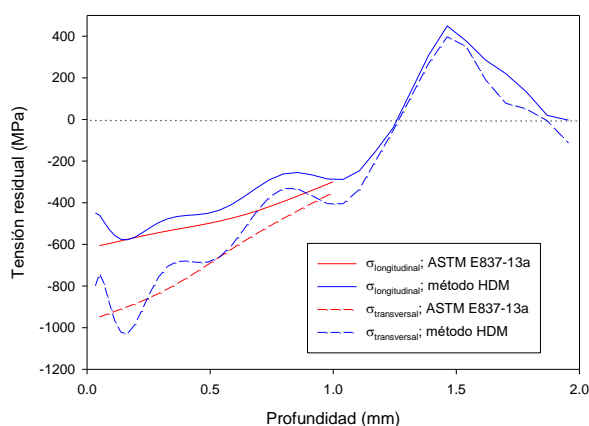


Figura 9 Comparación cálculo ASTM E837-13a con método HDM, para $p = 100$ bar y $a = 0.15$ mm.

Cabe destacar que en todos los resultados obtenidos en el presente trabajo las tensiones están muy por encima del límite elástico por lo que en un principio son una sobreestimación de la distribución real. La corrección por plasticidad es complicada al ser un problema inverso y debido a que una vez ha plastificado no puede aplicarse el principio de superposición. Sin embargo, el material analizado presenta un endurecimiento elevado por lo que la deformación plástica no será excesiva incluso para altas tensiones.

5. CONCLUSIONES

Se ha establecido un procedimiento destinado a analizar las tensiones residuales en componentes metálicos, particularizándolo para unas muestras sometidas a Deep Rolling. El objetivo principal era estudiar y comprender el método del Hole Drilling, especialmente el problema inverso de hallar una distribución de tensiones a partir de unas deformaciones experimentales. No obstante, se han derivado algunas conclusiones en cuanto a los parámetros del proceso de Deep Rolling. El efecto del paso se muestra en la forma de la distribución, obteniendo unas profundidades mayores con pasos

pequeños; esto puede indicar que en cada pasada hay una influencia en la región adyacente a la zona de contacto. Por otro lado, el aumento de las tensiones residuales de compresión con el aumento de la presión queda patente en la Figura 6 aunque no es tan claro para un paso menor.

En futuras investigaciones se implementarán simulaciones por elementos finitos tanto del proceso de Deep Rolling como de la medida del Hole Drilling. En el caso del Hole Drilling, es especialmente necesario este enfoque numérico debido a la necesaria optimización de los coeficientes y a los efectos plásticos que no han sido considerados aquí.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida por el proyecto de la Junta de Castilla y León "Procesos de generación de tensiones residuales sobre aceros de alta resistencia para la mejora de la vida a fatiga de componentes de altas presiones para la industria alimentaria", Referencia del proyecto.- BU053U16.

REFERENCIAS

- [1] Avilés, R., Albizuri, J., Rodríguez, A., and De Lacalle, L. L. "Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel." *International journal of fatigue* 55 (2013): 230-244.
- [2] SINT Technology, RESTAN MTS 3000. http://www.sintechnology.com/RESTAN_MTS3000
- [3] Schajer, G. S. (1988). Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I—Stress calculation procedures. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 110(4), 338-343.
- [4] ASTM E837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [5] Beghini, M., & Bertini, L. (1998). Recent advances in the hole drilling method for residual stress measurement. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 7(2), 163.
- [6] Rodríguez, A., de Lacalle, L. L., Celaya, A., Lamikiz, A., & Albizuri, J. (2012). Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique. *Surface and Coatings Technology*, 206(11-12), 2817-2824.