

Survey on the elastoplastic behavior in the process of rotary draw bend of tubes

Jorge Luis Hurtado¹, Raúl Santana Milán², Sergio Padrón Soroa³

¹Universidad Politécnica Territorial de Aragua "Federico Brito Figueroa".
Municipio José Félix Ribas, Aragua, Venezuela. Telf.: +58-244-3214620-3211856 Apdo 109.

Código Postal 2121-IUET-LV jorgeluis946@yahoo.es; jorgeluis946@gmail.com

²Universidad de Holguín. Holguín, Cuba. Telf.: +53-24-482678, Apartado Postal 57.

rsmilan2000@yahoo.com; santana@cadcam.uho.edu.cu

³Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Santa Clara, Villa Clara, Cuba. Telf.: +53-42-281517. sergiops@uclv.edu.cu;

sergiofelix.padron0@gmail.com

Abstract

Rotary draw bend of tubes is a process widely used in various industrial applications, such as automotive, aerospace and others. Plastic-deformation theory is employed to investigate the plastic deformation in pipe and tube bending. The major contribution of this paper is that it provides solutions to seven common tube-bending questions, these are: (1) deviation of neutral axis; (2) bending moment; (3) calculation of the feed preparation length of the bend; (4) determining of the angle and radii of springback compensation (5) wall thickness change; (6) flattening and (7) wrinkling on the inside of the curve. This paper shows a procedure to evaluate the influence of axial effort and internal pressure in the thickening or thinning of the wall and the variation of the radius in the cross section of the tube. A new mathematical model and its evaluation using software are discussed.

Keywords: rotary draw bend of tubes, elastic-plastic analysis.

Estudio del comportamiento elastoplástico en el proceso de doblado de tubos por arrastre

Resumen

El doblado de tubos por arrastre es un proceso utilizado en diferentes aplicaciones industriales, tales como la industria automovilística, aeroespacial y otras. La teoría de la deformación plástica es utilizada para el estudio de las deformaciones que ocurren en el proceso. La mayor contribución de este artículo es que provee una solución a siete preguntas comunes en el doblado de tubos por este método, ellas son: (1) desviación del eje neutro del tubo; (2) cálculo del momento flector del doblado; (3) cálculo de la longitud inicial de la curva; (4) cálculo del ángulo y radio de compensación de la recuperación elástica; (5) variación del espesor de la pared del tubo; (6) aplanamiento de la pared del tubo y (7) formación de arrugas en la parte interna de la curva. En el presente trabajo se muestra un procedimiento para evaluar la influencia de la carga axial y la presión interna en el engrosamiento o afinamiento de la pared y en la variación del radio en la sección transversal del tubo. Un nuevo modelo matemático y su evaluación mediante un software se discuten.

Palabras clave: doblado de tubos por arrastre, análisis elastoplástico.

Introducción

En los últimos años han sido estudiados los fenómenos que ocurren en el proceso de doblado de tubos por arrastre, tales como la recuperación elástica, las variaciones del espesor de pared y el radio del tubo, formación de arrugas en la parte interna de la curva y otros [1-4]. Sin embargo, la mayoría de esos estudios se basan en uno o dos de estos tópicos. Para la fecha, ninguna investigación se ha hecho involucrando al mismo tiempo a todos los fenómenos que comprenden el doblado de tubos por arrastre, a pesar de que estos se asocian entre sí y tienen lugar simultáneamente.

Muchos autores [1, 2, 5], insisten en que uno de los problemas fundamentales del doblado de tubos, es el fenómeno de la variación del espesor de pared y del radio de la curvatura del tubo doblado. Ello está directamente relacionado con el afinamiento de la pared del tubo en la parte exterior y el engrosamiento en la parte interior de la curva, así como la reducción del radio del tubo en la parte de la sección transversal sometida a los mayores esfuerzos a tracción y compresión, y el incremento del radio en los sitios cercanos a la línea neutra [6]. En la actualidad se han desarrollado varios trabajos por diferentes autores para tratar esta problemática, destacándose los trabajos de Ceclan [7], Achimas [8-10] que desarrollan un modelo por elementos finitos para la simulación del proceso de doblado de tubos. Uno de los trabajos más completos en este sentido es el trabajo de Wang [3] donde se analiza la influencia de las cargas externas en el adelgazamiento o engro-

samiento y aplanamiento de la pared del tubo. Por su parte, Strano [1] analiza un procedimiento para diseñar automáticamente las herramientas que intervienen en el proceso de doblado de tubos. Wang [2] y Yang [4], desarrollan un procedimiento basado en un método energético para determinar el mínimo radio del dado curvo a usar con vistas a evitar el arrugamiento de la zona interna de la curva del tubo durante el proceso de doblado. Por otro lado, Tang [11] desarrolla un trabajo similar a este para el método de doblado de tubos por compresión. Kirby [12] desarrolla un trabajo de optimización para incrementar la formabilidad tanto de piezas sometidas a procesos de doblado de tubos como hidroformado.

Del análisis anterior se puede apreciar que el doblado de tubos es una temática estudiada en la actualidad, pero quedan aún aspectos por definir, tales como los que se plantean en este trabajo.

Desarrollo

En el doblado de tubos por arrastre intervienen 5 herramientas fundamentales: los dados (curvo y de presión, mordaza y soporte) y mandril interno, tal como se ilustra en la Figura 1. En el lado izquierdo de esta figura se indica el instante ante inicial del doblado, y del lado derecho el doblado en proceso.

En la Figura 2 se ilustra el estado de esfuerzos a que está sometido el tubo durante el proceso de doblado. En el tubo aparecen esfuerzos a tracción σ_{xm} y σ_{xf} en la sección transversal ocasionados por el momento flector de doblado M y

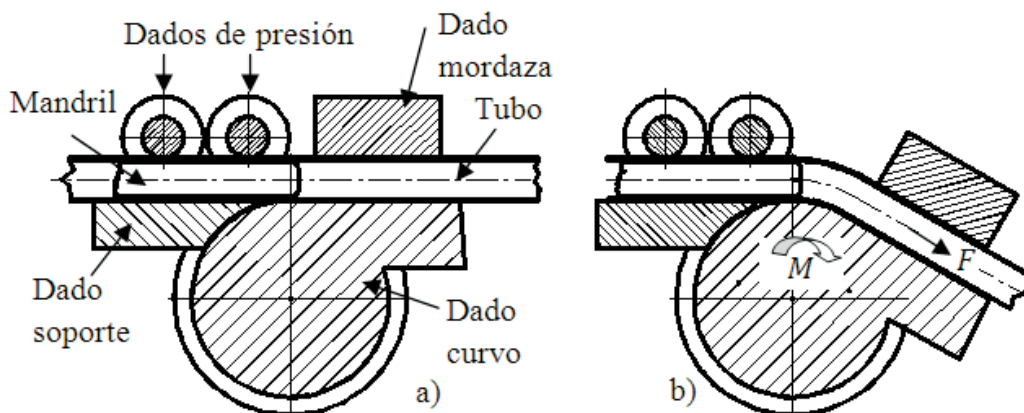


Figura 1. Herramientas que intervienen en doblado de tubos por arrastre. Fuente: Strano [1].

por la carga a tracción F . El trabajo del mandril se simula como una presión interna p_i , y a consecuencia de estos esfuerzos aparece también cierto esfuerzo circunferencial σ_c . Toda la deformación ocurre dentro del ángulo θ , y el análisis se realiza para un segmento elemental ubicado a cierto ángulo α dentro de la sección transversal del tubo.

Algunas ecuaciones en este trabajo han sido simplificadas a fin de obtener las soluciones más fáciles de comprender.

Desviación del eje neutro

La desviación del eje neutro en el doblado se ilustra en la Figura 3.

En el modelo matemático establecido por Wang [3] y Duncan [13] se establece que la desviación de este eje neutro e en el doblado del tubo está relacionada directamente con la magnitud del radio y el ángulo φ de la siguiente manera:

$$e = r \sin \varphi \tag{1}$$

donde φ es el ángulo que define la magnitud del desplazamiento e (Figura 3).

Según Duncan [13], la magnitud del ángulo φ está relacionada con la magnitud de la carga axial F y se calcula de la siguiente manera:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{F}{2Ytr} \right) \tag{2}$$

donde:

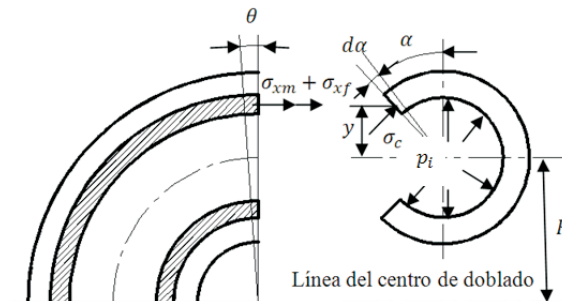
- Y es el límite de fluencia del material del tubo;
- t es el espesor inicial del tubo;
- r es el radio medio del tubo, el cual se calcula, según Wang [3], de la siguiente forma:

$$r = \frac{D - t}{2} \tag{3}$$

D es el diámetro del tubo.

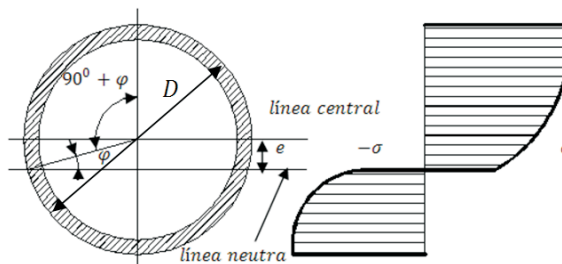
Momento de doblado

Según Wang [3], el momento aplicado en el proceso alcanza una magnitud suficiente para proporcionar un esfuerzo normal σ_{xm} en la sección transversal del tubo, equivalente al valor del



Fuente: Wang [3].

Figura 2. Esfuerzos en el proceso de doblado de tubos por arrastre. $d\alpha$ es el ángulo elemental del segmento elemental analizado, R es el radio de doblado (radio del dado curvo), y $y = r \cos \alpha$, es la distancia vertical entre el centro del segmento elemental y el centro del tubo.



Fuente: Wang [3].

Figura 3. Desplazamiento del eje neutro.

límite de fluencia Y , por esta razón, por definición se puede determinar el valor del momento de la siguiente manera:

$$M = \frac{2I_0 Y}{D} \tag{4}$$

I_0 es el momento de inercia de la sección del tubo, y se calcula mediante la expresión:

$$I_0 = \frac{\pi(D^4 - D_0^4)}{64} \tag{5}$$

D_0 es el diámetro interno del tubo.

El momento total del doblado M_T , o sea, el momento que es necesario aplicar al dado curvo para realizar la operación de doblado, se puede determinar de la siguiente forma:

$$M_T = M + FR \tag{6}$$

Cálculo de la longitud inicial de la curva

La longitud inicial del tubo es más corta que la longitud de la curva después del doblado [11]. Esto se debe al desplazamiento de la línea neutra. Este desplazamiento ocurre paulatinamente en cierto ángulo β que delimita al sector de transición, y luego hay otro sector de desviación constante delimitado por el ángulo $\gamma_0 - 2\beta$ (Figura 4).

Según Tang [11] esa longitud inicial del tubo para el método por compresión se puede calcular de la siguiente manera:

$$l_i = R\gamma_0 - e(\gamma_0 + \beta)$$

Y en el sector de transición se considera que el valor del desplazamiento de la línea neutra tendrá un valor igual a la mitad de e .

Sin embargo para el método de doblado por arrastre se deduce de la siguiente forma:

$$l_i = l_c + l_t \quad (7)$$

donde:

l_c es la longitud del sector de desviación constante y se calcula por la siguiente expresión:

$$l_c = (R - e)(\gamma_0 - 2\beta) \quad (8)$$

l_t es la longitud del sector de transición y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$l_t = \left(R - \frac{e}{2}\right)2\beta \quad (9)$$

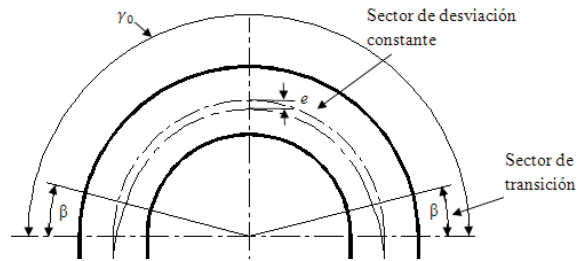
Se sustituyen entonces las ecuaciones (8) y (9) en la ecuación (7) y se obtiene:

$$l_i = R\gamma_0 - e(\gamma_0 - \beta) \quad (10)$$

El ángulo de transición β se puede tomar aproximadamente $\beta \cong 5^\circ$ [14] para el doblado por arrastre.

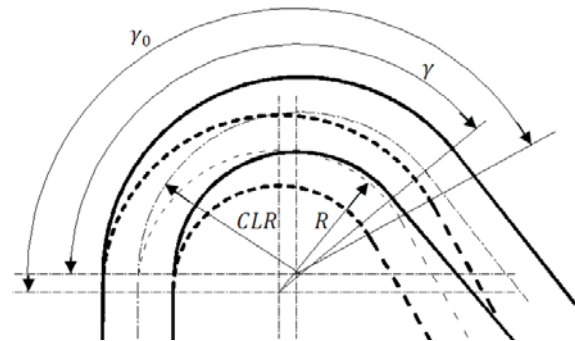
Cálculo del ángulo y del radio de compensación de la recuperación elástica

Después de cada operación de doblado el radio de la curva final CLR será más grande que el radio del dado curvo R [1] (Figura 5).



Fuente: Tang [11].

Figura 4. Sectores de desviación de la línea neutra. γ_0 es el ángulo total de doblado.



Fuente: Tracto-Technik [15].

Figura 5. Ángulos y radios en la recuperación elástica. γ es el ángulo de doblado que se desea obtener después de la recuperación elástica.

La relación entre ambos radios según Strano [1], se puede establecer de la siguiente manera:

$$\frac{R}{CLR} = 1 - \frac{MR}{EI_0} \quad (11)$$

E es el módulo elástico del material del tubo.

Ya que la deformación longitudinal ε_{xe} es muy pequeña para la mayoría de los casos, se puede considerar según Strano [1], que la relación entre los radios y ángulos anteriores y posteriores al doblado es:

$$CLR \gamma = R\gamma_0 \quad (12)$$

Sin embargo, si se considera que después del doblado habrá tres deformaciones de recupe-

ración elástica (radio, ángulo y longitud de la curva), entonces es fácil ver que la relación definitiva se puede determinar según criterio del autor de este trabajo, mediante la siguiente ecuación:

$$CLR \gamma = R \gamma_0 (1 - \varepsilon_{xe}) \quad (13)$$

La deformación axial elástica ε_{xe} es producida por el esfuerzo σ_{xf} y por definición se sabe que:

$$\varepsilon_{xe} = \frac{\sigma_{xf}}{E} \quad (14)$$

Variación del espesor de la pared del tubo

La ecuación que establece la variación del espesor de la pared del tubo en la curva, en su sección transversal, según Wang [3], es la siguiente:

$$t_\alpha = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K+1) + \frac{P_t r}{2t}(K+3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K-2) + \frac{P_t r}{2t}K} \times \left[\frac{r}{R}(\cos \alpha + \cos \varphi) \right] \right\} t$$

Sin embargo de acuerdo a los métodos deductivo y experimental se establece que la ecuación correcta es:

$$t_\alpha = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K+1) + \frac{P_t r}{2t}(K+3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K-2) + \frac{P_t r}{2t}K} \times \left[\frac{r}{R}(\cos \alpha + \sin \varphi) \right] \right\} t \quad (15)$$

σ_{xm} se puede calcular según Wang [3], de la siguiente manera:

$$\sigma_{xm} = \pm \frac{Y}{\sqrt{K^2 - K + 1}} \quad (16)$$

σ_{xf} se puede calcular según Wang [3], de la siguiente forma:

$$\sigma_{xf} = \frac{F}{2\pi r t} \quad (17)$$

K – Coeficiente de la deformación variable [3] en el tubo, y se calcula:

$$K = \ln \frac{R+r}{R+r \cos \alpha} \quad (18)$$

La función adelgazamiento según criterio del autor de este trabajo se puede plantear de la siguiente manera:

$$f_t = \frac{t - t_\alpha}{t} \times 100\% \quad (19)$$

Variación de la magnitud del radio del tubo y efecto de aplanamiento

La ecuación que establece la variación del radio del tubo en la curva, en su sección transversal, según Wang [3], es la siguiente:

$$r_\alpha = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K-1) + \frac{P_t r}{2t}(2K+3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K-2) + \frac{P_t r}{2t}K} \times \left[\frac{r}{R}(\cos \alpha + \cos \varphi) \right] \right\} r$$

Sin embargo de acuerdo a los métodos deductivo y experimental se establece que la ecuación correcta es:

$$r_\alpha = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K-1) + \frac{P_t r}{2t}(2K+3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K-2) + \frac{P_t r}{2t}K} \times \left[\frac{r}{R}(\cos \alpha + \sin \varphi) \right] \right\} r \quad (20)$$

El efecto de aplanamiento se puede calcular, según Wang [3], de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \times 100\% \quad (21)$$

donde D_{\max} es el diámetro mayor del tubo deformado, donde $\alpha = \frac{\pi}{2}$, ó $\alpha = \frac{3\pi}{2}$ y D_{\min} es el diáme-

tro menor del tubo deformado, donde $\alpha = 0$, y $\alpha = \pi$.

Formación de arrugas en la parte interna de la curva

Según Wang [3], la condición necesaria para la cual no se formarían arrugas en la parte interna de la curva es cuando se cumple la siguiente condición:

$$DOB - \frac{R}{D} \geq 2 \quad (22)$$

donde DOB es el grado del doblado.

No obstante, otros factores tienen gran influencia en el fenómeno de la aparición de arrugas en la parte interna de la curva, tales como el factor de pared WF [15], el cual se calcula de la siguiente manera:

$$WF = \frac{D}{t} \quad (23)$$

Mientras mayor es este valor, mayor es la posibilidad de formación de arrugas.

Otro factor que influye es la ductilidad del material: mientras menos dúctil es el material, mayor es la probabilidad de formación de arrugas.

Otro factor que influye en la formación de arrugas es la magnitud del esfuerzo axial σ_{xf} . El incremento de este esfuerzo puede eliminar o al menos disminuir las arrugas en la curva, pero el incremento exagerado de este esfuerzo puede adelgazar excesivamente la pared externa de la curva.

Finalmente, otro factor que influye también en la formación de arrugas es la magnitud de la presión interna p_i en el tubo. El incremento de esta presión disminuye la formación de arrugas en la curva, también influye en el incremento del adelgazamiento de la pared e incrementa también el aplanamiento. La magnitud de esta presión interna está relacionada con la magnitud de la holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo. Zhao [16] recomienda un valor de 0,15 mm para doblado de tubos rectangulares por este método.

La función arrugas para un determinado material, DOB y WF , en función del esfuerzo axial

σ_{xf} y la presión interna p_i , según criterio del autor de este artículo se puede plantear de la siguiente forma:

$$f_w = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{xi \max}} < 1 \quad (24)$$

σ_{xi} es el esfuerzo variable a compresión en la parte interna de la curva, donde $\alpha = \pi$, y se calcula:

$$\sigma_{xi} = -\frac{Y}{\sqrt{K^2 - K + 1}} + \sigma_{xf} + \frac{p_i r}{2t} \quad (25)$$

$\sigma_{xi \max}$ es el esfuerzo máximo a compresión en la parte interna de la curva y se calcula:

$$\sigma_{xi \max} = -\frac{Y}{\sqrt{K^2 - K + 1}} + \sigma_{xf \min} + \frac{p_{i \min} r}{2t} \quad (26)$$

$\sigma_{xf \min}$ es el valor mínimo posible para el esfuerzo axial.

$p_{i \min}$ es el valor mínimo posible para la presión interna.

El análisis de la formación de arrugas se lleva a cabo en la posición donde el esfuerzo normal a compresión es mayor, o sea, en la parte interna de la curva en donde $\alpha = \pi$ y para el grado de doblado crítico, $DOB = 2$.

Estos dos últimos esfuerzos no deben ser nunca iguales a cero, pues se distorsionaría la esencia del método de doblado por arrastre, en donde estas cargas siempre deben estar presentes. Mientras más pequeño es el valor de f_w , menor será la posibilidad de formación de arrugas.

Restricciones

Las restricciones son todos aquellos valores que tienen que satisfacer, como condiciones, los parámetros variables para considerar que el diseño es correcto. Por tales razones, todas las restricciones dependen de los parámetros variables y se definen matemáticamente como limitaciones específicas, inferiores o superiores, impuestas sobre las variables de diseño o sobre los parámetros asignados en forma de ecuaciones e inecuaciones.

En este caso de estudio de doblado de tubos por arrastre las restricciones a considerar según

la experiencia, la deducción y la data experimental del autor de este trabajo, se ilustran en la Tabla 1.

El momento flector de doblado no es una variable de decisión, este factor depende del material y la geometría del doblado, lo cual son variables de coordinación que no pueden variar a conveniencia en el proceso como la presión interna y el esfuerzo axial.

Resultados

En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados de la corrida del programa MATHEMATICA7 de la ecuación (15). Inicialmente se tomó una presión interna constante $p_i = 16$ MPa, y se varió el esfuerzo axial en $\sigma_{xf} = 30, 40$ y 50 MPa (Figura 6), luego se considera el esfuerzo axial constante $\sigma_{xf} = 40$ MPa y se varía la presión interna $p_i = 14, 16$ y 18 MPa (Figura 7), en un tubo de $25,4$ mm de diámetro, con espesor de pared $t = 0,9$ mm, un radio de doblado $R = 50,8$ mm.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los resultados de la corrida del programa MATHEMATICA7 de la ecuación (20) con la misma geometría anterior y las mismas consideraciones de carga.

La zona de mayores valores del incremento del espesor del tubo corresponde a la parte interna de la curva durante el proceso de doblado, donde se producen tensiones de compresión y un engrosamiento de la pared, sin embargo, en el resto de las zonas del tubo lo que se produce es un adelgazamiento de la pared.

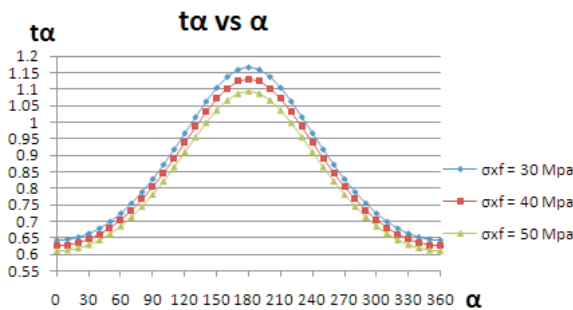


Figura 6. Variación del espesor de la pared del tubo, con una presión interna constante $p_i = 16$ MPa, y el esfuerzo axial variable en $\sigma_{xf} = 30, 40$ y 50 MPa.

Tabla 1
Variables de coordinación y límites de las variables de decisión para el doblado de tubo por el método de arrastre

Variables de coordinación		
Material	Acero AISI 1020 Steel, normalized at 870°C [17]	
Radio de doblado	R	50,8 mm
Espesor de pared	t	0,9 mm
Límite de fluencia del material	Y	345 MPa
Diámetro del tubo	D	25,4 mm
Radio medio del tubo	r	12,25 mm
Elongación relativa		35,8%
Variables de decisión		
Esfuerzo axial	σ_{xf}	(30 ÷ 50) MPa
Presión interna	p_i	(14 ÷ 18) MPa

Asimismo se observa que el radio del tubo en la curva aumenta en las zonas donde $\alpha = \frac{\pi}{2}$ y $\frac{3\pi}{2}$ y disminuye donde $\alpha = 0$ y π . En las Figuras 6 y 7 se observa que el adelgazamiento es más severo cuando se incrementa la carga axial y la presión interna. En las Figuras 8 y 9 se observa que cuando se incrementa la carga axial disminuye la

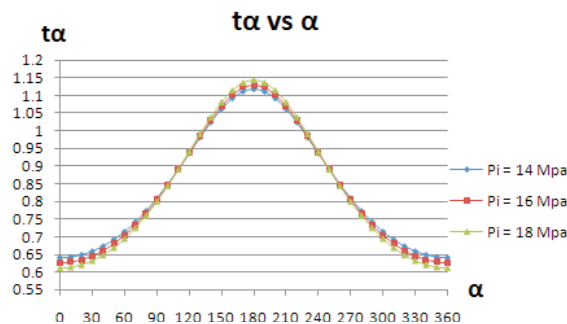


Figura 7. Variación del espesor de la pared del tubo, con una presión interna variable $p_i = 14, 16$ y 18 MPa, y el esfuerzo axial constante en $\sigma_{xf} = 40$ MPa.

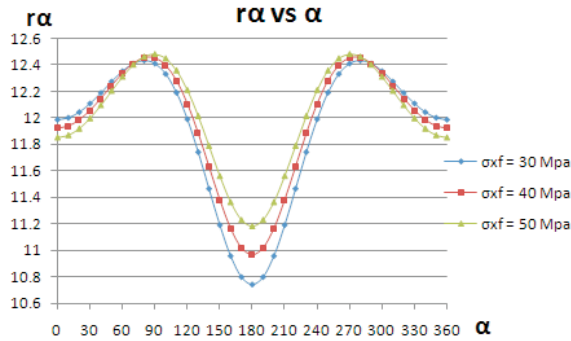


Figura 8. Variación del radio del tubo, con una presión interna constante $p_i = 16$ MPa, y el esfuerzo axial variable en $\sigma_{xf} = 30, 40$ y 50 MPa.

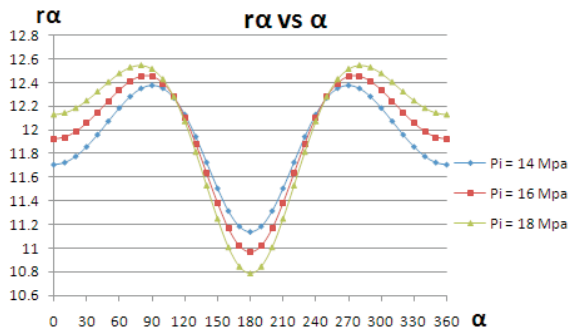


Figura 9. Variación del radio del tubo, con una presión interna variable $p_i = 14, 16$ y 18 MPa, y esfuerzo axial constante $\sigma_{xf} = 40$ MPa.

distorsión del radio pero ésta se incrementa con la máxima presión interna.

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es proporcionar una predicción de los fenómenos en el doblado del tubo por el método de arrastre. La principal contribución consiste en que proporciona solución a siete preguntas comunes en el doblado de tubos por este método, las ecuaciones están basadas en la teoría de la deformación plástica. Las ecuaciones propuestas son capaces de establecer el adelgazamiento y engrosamiento de la pared y la distorsión del radio del tubo, el cálculo de la longitud inicial de la curva de doblado, la desviación del eje neutro, el momento flector de doblado, ángulo y radio de compensación de la recuperación elástica y la formación de arrugas, de acuerdo a la magnitud de la carga axial y la pre-

sión interna. La utilización de este conocimiento permite la mejora de la calidad de los productos terminados, el establecimiento de cargas para cada caso específico y también, la posibilidad de cálculo de las posiciones longitudinales y angulares iniciales del doblado, y todo este conocimiento puede repercutir en un ahorro de tiempo y costo en la producción al poder evitar el desarrollo de los prototipos por ensayo y error, las ecuaciones propuestas también pueden servir para cálculo de doblado de tubos por el mismo método con otros materiales tales como cobre, aluminio y otros aceros dúctiles.

Referencias bibliográficas

1. Strano, M.: "Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes". International Journal of Advantages of Manufacturing Technologies, Vol. 26, (2005) pp. 733-740.
2. Wang, X. and Cao, J.: "Wrinkling Limit in Tube Bending". Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 123, (2001) pp. 430-435.
3. Wang, J. and Agarwal, R.: "Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure". Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, No. 2 (2006) pp. 598-605.
4. Yang, H. and Lin, Y.: "Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 152 (2004) pp. 363-369.
5. Jin, Z., Luo, S. and Fang, X.D.: "KBS-aided design of tube bending processes". Engineering Application of Artificial Intelligence, Vol. 14, (2001) pp. 599-606.
6. Stachowicz, F.: "Bending with upsetting of copper tube elbows". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 100 No. 1-3 (2000) pp. 236-240
7. Ceclan, V.A., Achimaş, G., Lăzărescu, L. and Groze, F.M. Finite Element Simulation of Tubes Press Bending Process. 7th International Multidisciplinary Conference Baia Mare, Romania, 2007).
8. Achimas, G., L., C. and S., L., L. Quality Assurance of the Bent tubes Using finite Element Simulation. 3rd International Congress on Precision Machining (ICPM), pp. 43-48 Austria, Viena, 2005).

9. Achimaş, G. and Lăzărescu, L.: "Experimental Investigations about Influences on Springback of Bent Tubes". *Computing and Solutions in Manufacturing Engineering* (2004).
10. Achimas, G., V.A., C., L., L. and Groze, F: "Experimental Research Concerning the Influence of the Bending Radius on the Wall Thickness of the Bent Pipes". *microCAD* (2007) pp. 7-11.
11. Tang, N.C.: "Plastic-deformation analysis in tube bending". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 77 No. 12 (2000) pp. 751-759.
12. Kirby, D., Roy, S. and Kunju, R.: "Optimization of tube hydroforming With Consideration of Manufacturing Effects On Structural Performance". *Materials & Design*, Vol. 778 (2005) pp. 585-590.
13. Duncan, J.L., Marciniak, Z. and Hu, S.J.: "Mechanics of Sheet Metal Forming". Butterworth-Heinemann 2002.
14. Lou, H. and Stelson, K.A.: "Three-Dimensional Tube Geometry Control for Rotary Draw Tube Bending, Part 1: Bend Angle and Overall Tube Geometry Control". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, (2001) pp. 258-265.
15. Tracto-Technik. Tracto-Technik Automated Fabrication of Template Pipes. In <http://pipebending.tracto-technik.com/index.cfm?linkArticleID=32, ed2009>.
16. Zhao, G., Liu, Y. and Yang, H.: "Effect of clearance on wrinkling of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process ". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50 No. 1-4, (2010) pp 85-92.
17. MatWeb. MatWeb Material Properties Data Acero. In <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b58ee61a3745453a9232f7864abba74f, ed2011>).

Recibido el 26 de Noviembre de 2010

En forma revisada el 28 de Noviembre de 2011