

Análisis y síntesis de la planeación del proceso de doblado de tubos por arrastre

Analysis and synthesis of planning for rotary draw bending of tubes processes

Hurtado Ortega, Jorge Luis^{1*}; Santana Milán, Raúl²; Ruiz, José Arzola³

¹ Universidad Politécnica Territorial de Aragua “Federico Brito Figueroa”. Estado Aragua. Venezuela. -UPTA

² Universidad de Holguín Av. XX Aniversario Km 1,5, Piedra Blanca, Holguín, Cuba.

³ José Arzola Ruiz, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, La Habana, Cuba, jorgeluis946@yahoo.es*

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados principales del análisis realizado de la tarea de generación de la tecnología de doblado de tubos metálicos por el método de arrastre. Se desarrolla un modelo de optimización bajo criterios múltiples que permite hallar un compromiso razonable entre los tres defectos principales inherentes a esta tecnología: adelgazamiento, aplanamiento del lado interno y externo de la curva y formación de arrugas. Durante el proceso de búsqueda se minimiza la distancia de Tchebycheff, ponderada y normalizada de los indicadores señalados, desde niveles de aspiración del decisor hasta el espacio de existencia de los criterios. Los resultados del modelo se validan con la simulación de las deformaciones y con resultados obtenidos en talleres de producción.

Palabras clave: Doblado de tubos por arrastre, optimización bajo criterios múltiples.

Abstract

In this work, the main results of the analysis about the creation of a technology for metallic tube blending by the pulling method, are presented. It is shown an optimization model by multiple criteria, which allows to find a reasonable compromise between the three main faults that are inherent to this technology: Thinning, flattening on the external and internal side of the curve and wrinkling. During the searching procedure, the Tchebycheff distance is minimized, such distance is ponderated and normalized by the mentioned indicators; from the aspiration levels of the decider to the existant criteria spaces. The model results are validated with the deforming simulation and the results that are obtained in the factories.

Key words: Rotary draw bend of tubes, multiple criteria optimization, CAPP systems.

1 Introducción

En los últimos años se han estudiado los fenómenos que ocurren en el proceso de doblado de tubos por arrastre, tales como la recuperación elástica, las desviaciones del espesor de pared y el radio del tubo, formación de arrugas en la parte interna de la curva y otros, (Yang y col., 2004; Strano, 2005; Wang y col., 2006), 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, tampoco existen trabajos en donde se establezca un modelo de optimización multiobjetivo que pueda hallar un compromiso

razonable entre los tres defectos principales inherentes a esta tecnología: adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas. Muchos autores (Wang y col., 2001; Strano, 2005; Wang y col., 2006) 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 en la curvatura del tubo doblado y la formación de arrugas en la parte interna de la curva. 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 del tubo en la sección transversal en los sitios cercanos al plano por donde pasa la

línea neutra y que es perpendicular al radio de doblado. En la actualidad se han desarrollado varios trabajos por diferentes autores para tratar esta problemática, destacándose los trabajos de (Achimas y col., 2007; Ceclan y col., 2007) que desarrollan un modelo por elementos finitos para la simulación del proceso de doblado de tubos. Unos de los trabajos más importantes en este sentido son los trabajos de (Wang y col., 2001; Yang y col., 2004), que 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. (Hurtado y col., 2011c; Hurtado y col., 2012d) propone una solución a siete preguntas comunes del método de doblado de tubos por arrastre, (Hurtado y col., 2011b) establece las ecuaciones que determinan la variación del espesor y radio del tubo en el proceso de doblado de tubos por arrastre. (Hurtado y col., 2011a; Hurtado y col., 2012a; Hurtado, 2013) propone un modelo de optimización multi-objetivo por el método exploración del programa de Tchebycheff para hallar un compromiso razonable entre los tres defectos inherentes a la tecnología de doblado de tubos por arrastre. (Hurtado y col., 2012c) determina las fronteras del campo de existencia de las variables de decisión esfuerzo axial y presión interna según el tipo de material y geometría del tubo y herramientas en el doblado de tubos por arrastre. (Hurtado y col., 2012b) determina la relación entre la magnitud de la presión interna en el tubo y la holgura entre mandril y diámetro interno del tubo. 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.

2 Desarrollo

En el doblado de tubos por arrastre intervienen cinco herramientas fundamentales: los dados (curvo y de presión, mordaza y soporte) (Strano, 2005; Wang y col., 2006) y mandril interno, tal como se ilustra en la figura 1. En el lado izquierdo de esta figura se indica el instante inicial del doblado, y del lado derecho el doblado en proceso.

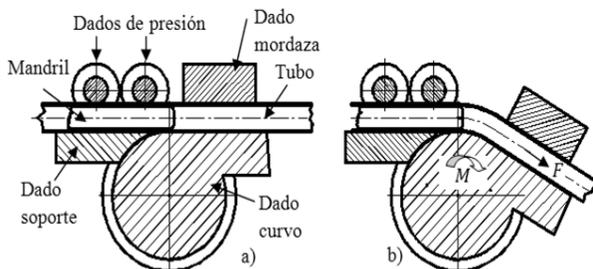


Fig. 1 Herramientas que intervienen en doblado de tubos por arrastre. Fuente: (Strano, 2005; Wang y col., 2006)

Estas herramientas proporcionan las siguientes cargas:

a) M- momento del doblado, b) una carga de apriete P entre los dados de presión y soporte y c) otra carga también de apriete P_1 entre el dado mordaza y la parte recta del dado curvo, y a consecuencia de estas dos últimas cargas se produce por fricción una carga a tracción F. Tales cargas se ilustran en la figura 2.

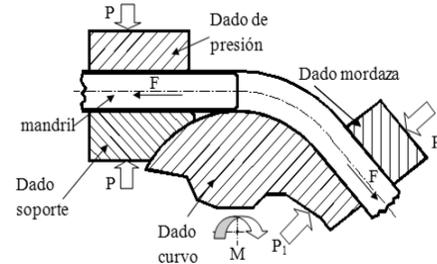


Fig. 2 Cargas necesarias en el doblado de tubos por arrastre

Estas cargas a su vez producen un estado de esfuerzos al que será sometido el tubo durante el proceso de doblado (Ver figura 3). En el tubo aparecen esfuerzos normales a tracción y compresión σ_{xm} producidos por el momento flector de doblado M y un esfuerzo a tracción σ_{xf} a consecuencia de la carga a tracción F que se genera a consecuencia de las fuerzas de apriete P y P_1 . 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.

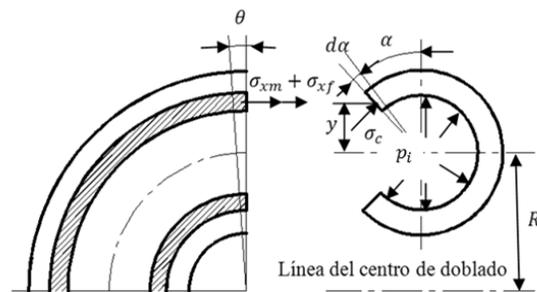


Fig. 3 Esfuerzos en el proceso de doblado de tubos por arrastre. Fuente: (Wang J y Agarwal R, 2006)

- $d\alpha$ es el ángulo elemental del segmento elemental analizado, R es el radio de doblado (radio del dado curvo), y y es la distancia vertical variable entre el centro del segmento elemental y el centro del tubo.
- A consecuencia de todos los esfuerzos y deformaciones que ocurren en el proceso de doblado se originan inevitablemente defectos de adelgazamiento y aplanamiento y formación de arrugas en las partes externa e interna de la curva. Tales defectos se ilustran en la figura 4.

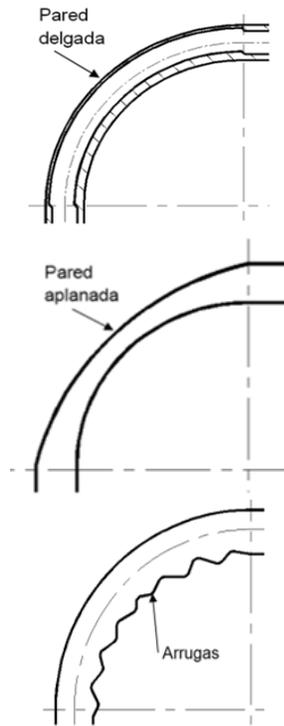


Fig. 4 Defectos típicos en el doblado de tubos por arrastre. Fuente (Strano, 2005; Wang y col., 2006)

2.1 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 (Wang y col., 2006), es la siguiente:

$$t_{\alpha} = 1 + \frac{\sigma_{xm} + \sigma_{xf}}{\sigma_{xm} + \sigma_{xf}} \frac{K+1 + \frac{p_i r}{2t} K+3}{K-2 + \frac{p_i r}{2t} K} \epsilon_x t \quad (1)$$

σ_{xm} se puede calcular de la siguiente manera:

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

En donde:

Y es el límite de fluencia del material del tubo.

K es el coeficiente de la deformación variable (Wang (Wang y col., 2006)) en el tubo, y se calcula:

$$K = \ln \frac{R+r}{R+r \cos \alpha} \quad (3)$$

σ_{xf} puede calcular de la siguiente forma:

$$\sigma_{xf} = \frac{F}{2\pi r t} \quad (4)$$

r es el radio medio del tubo, y se calcula:

$$r = \frac{D-t}{2} \quad (5)$$

t es el espesor inicial de la pared del tubo.

D es el diámetro externo del tubo.

ϵ_x es la deformación axial y se calcula según Wang (Wang y col., 2006) de la siguiente manera:

$$\epsilon_x = \frac{r}{R} \cos \alpha + \cos \varphi$$

Sin embargo de acuerdo a los métodos deductivo y experimental (Hurtado y col., 2012d; Hurtado, 2013) se establece que la ecuación correcta es:

$$\epsilon_x = \frac{r}{R} \cos \alpha + \sin \varphi \quad (6)$$

φ es el ángulo que define la magnitud del desplazamiento de la línea neutra e , ver figura 5.

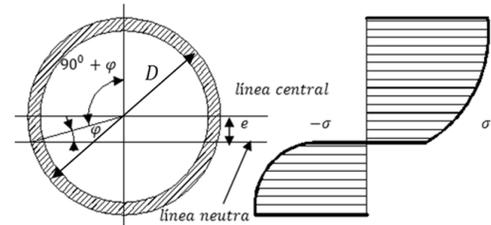


Fig. 5 Desplazamiento del eje neutro Fuente: Wang [3]

Según Duncan (Duncan y col., 2002), la magnitud del ángulo φ que determina la magnitud del desplazamiento del eje neutro e está relacionada con la magnitud de la carga axial F y se calcula de la siguiente manera:

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{F}{2Ytr} \quad (7)$$

2.2 Variación de la magnitud del radio del tubo

La ecuación que establece la variación del radio del tubo en la curva, en su sección transversal, según Wang (Wang y col., 2006), es la siguiente:

$$r_{\alpha} = 1 - \frac{\sigma_{xm} + \sigma_{xf}}{\sigma_{xm} + \sigma_{xf}} \frac{2K-1 + \frac{p_i r}{2t} 2K+3}{K-2 + \frac{p_i r}{2t} K} \epsilon_x r \quad (8)$$

2.3 Formación de arrugas en la parte interna de la curva

Según Wang (Wang y col., 2006), la condición necesaria para la cual no se formarán arrugas en la parte interna de la curva es cuando se cumple la siguiente condición:

$$DOB = \frac{R}{D} \geq 2 \quad (9)$$

En 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 (Tracto-Technik, 2009) WF, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$WF = \frac{D}{t} \quad (10)$$

Mientras mayor es este valor, mayor es la probabilidad 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 (Hurtado y col., 2012d; Hurtado, 2013). 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. (Hurtado, 2013) 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 pero disminuye el aplanamiento.

2.4 Las funciones objetivos son:

- Función adelgazamiento
- Función aplanamiento
- Función arrugas

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

$$f_t = \frac{t-t_\alpha}{t} \quad (11)$$

Ya que el análisis del adelgazamiento se lleva a cabo en la posición más delgada, o sea para $\alpha = 0$, si $\sigma_{xm} = Y$, sustituyendo esos valores en las ecuaciones (1), (2) y (3) y luego en la ecuación (11), se obtiene:

$$f_t = \frac{Y + \sigma_{xf} + 3\frac{p_i r}{2t}}{2Y + \sigma_{xf}} \times \frac{r}{R} \mathbf{1} + \frac{\pi \sigma_{xf}}{Y} \quad (12)$$

La función aplanamiento según Agarwal (Agarwal, 2004) se puede establecer de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (13)$$

El diámetro máximo D_{max} está ubicado en donde el radio es mayor, eso ocurre en el sitio donde $\alpha = \pi/2$ y $\alpha = 3\pi/2$, entonces:

Se sustituye α por $\pi/2$ en las ecuaciones (8), (2) y (3) y se obtiene:

$$D_{max} = 2 \mathbf{1} - \frac{\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf} \quad 2K\pi/2 - 1 + \frac{p_i r}{2t} \quad 2K\pi/2 + 3}{\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf} \quad K\pi/2 - 2 + \frac{p_i r}{2t} K\pi/2} \times \frac{\pi r \sigma_{xf}}{RY} r \quad (14)$$

El diámetro mínimo D_{min} en la sección transversal de la curva del doblado es la suma de los radios más pequeños, en donde $\alpha = 0$ y $\alpha = \pi$, se puede calcular de la siguiente manera: $D_{min} = r_0 + r_\pi$.

Sustituyendo: $\alpha = 0$ en la ecuación (8) y en las ecuaciones (2) y (3) y se obtiene:

$$r_0 = \mathbf{1} - \frac{Y + \sigma_{xf} - 3\frac{p_i r}{2t}}{2Y + \sigma_{xf}} \times \frac{r}{R} \mathbf{1} + \frac{\pi \sigma_{xf}}{Y} r \quad (15)$$

Para calcular r_π se sustituye α por π en las ecuaciones (8), (2) y (3) y se obtiene:

$$r_\pi = \mathbf{1} - \frac{\sigma_{xm\pi} - \sigma_{xf} \quad 2K\pi - 1 + \frac{p_i r}{2t} \quad 2K\pi + 3}{\sigma_{xm\pi} - \sigma_{xf} \quad K\pi - 2 + \frac{p_i r}{2t} K\pi} \times \frac{\pi r \sigma_{xf}}{RY} - \frac{r}{R} r \quad (16)$$

La función arrugas según el autor de este artículo (Hurtado, 2013) se puede establecer de la siguiente manera:

$$f_w = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{ximax}} \quad (17)$$

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

$\alpha = \pi$, entonces:

σ_{xi} - Esfuerzo variable a compresión en la parte interna de la curva.

$$\sigma_{xi} = -\frac{Y}{K\pi^2 - K\pi + 1} + \sigma_{xf} + \frac{p_i r}{2t} \quad (18)$$

σ_{ximax} es el esfuerzo máximo a compresión en la parte interna de la curva, y se puede determinar de la siguiente manera:

$$\sigma_{ximax} = -\frac{Y}{K\pi^2 - K\pi + 1} + \sigma_{xfmin} + \frac{p_{imin} r}{2t} \quad (19)$$

En donde:

σ_{xfmin} es el mínimo esfuerzo a tracción en el tubo.

P_{imin} es la presión mínima interna en el tubo.

2.5 Análisis externo del proceso como tarea de toma de decisiones de mayor envergadura

- La tarea de mayor envergadura asociada al proceso de fa-

bricación está constituida por la determinación de los parámetros de calidad exigidos (a través de los indicadores de eficiencia) en los productos fabricados, (Arzola, 2000). De tal manera, se seleccionan como variables de coordinación las siguientes: 1) material a doblar, 2) radio de doblado (R), 3) diámetro del tubo a doblar (D), 4) espesor del tubo (t) y 5) ángulo de doblado.

- Los indicadores técnicos proceso de fabricación se determinan por la minimización del efecto conjunto de estos defectos durante la fabricación. Así, se seleccionan como Indicadores de eficiencia, los siguientes: a) mínimo adelgazamiento b) mínimo aplanamiento y c) mínima arruga.
- Las variables que pueden ser gobernadas a voluntad durante la fabricación se encuentran la presión interna, el esfuerzo axial y la velocidad angular de giro del dado curvo. Sin embargo, aunque esta última variable adopta en las instalaciones predominantes el valor de entre 1,6 y 0,1 rad/s, (CMLUSA, 2010) (de acuerdo al diámetro del tubo y radio del dado curvo) la velocidad de deformación no se considera como variable, ya que debido a la variación de los radios del dado curvo, esa velocidad permanece casi constante para todos los casos, además el modelo matemático implementado no considera ni el coeficiente, ni el exponente de endurecimiento por deformación. De tal forma que, se seleccionan como variables de decisión para la planeación del proceso de fabricación las siguientes: 1) la presión interna p_i y 2) el esfuerzo axial σ_{xf} .

2.6 Variables intermedias de interés

Para la solución de la tarea estudiada resulta indispensable la determinación de los intervalos límites de definición de las variables de decisión, y aquellas variables que determinan los valores de adelgazamiento, aplanamiento y arruga del tubo doblado.

Así, se consideran como variables intermedias de interés, las siguientes: 1) presión interna mínima indispensable 2) presión interna máxima permisible 3) esfuerzo axial mínimo indispensable 4) esfuerzo axial máximo indispensable 5) grado de doblado DOB y 6) factor de pared WF.

2.7 Restricciones

En este caso de estudio de doblado de tubos por arrastre las restricciones a considerar según la experiencia, la deducción y los datos experimentales del autor de este trabajo, (Hurtado y col., 2012b; Hurtado y col., 2012c) 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.

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 (MatWeb, 2013)
Radio de doblado	R	50,8 mm
Límite de fluencia del material	γ	345 MPa
Elongación a la rotura		35,8 %
Diámetro del tubo	D	25,4 mm
Espesor de pared	t	0,9 mm
Radio medio del tubo	r	12,25 mm
Variables de decisión (según (Hurtado y col., 2012c))		
Esfuerzo axial mínimo	σ_{xfmin}	30 MPa
Esfuerzo axial máximo	σ_{xfmax}	50 MPa
Presión interna mínima	p_{imin}	14 MPa
Presión interna máxima	p_{imax}	18 MPa

2.8 Modelo matemático conceptual

De la clasificación de variables realizadas se deduce el siguiente modelo matemático:

$$\text{Minimizar } Z = \max w_1 f_t - f_t d, w_2 f_p - f_p d, w_3 f_w - f_w d, w_4 f_c - f_c d \quad (20)$$

En donde: Las expresiones $f_i d$ son los valores deseados para cada función objetivo. Las expresiones w_i son los valores de los pesos para cada función objetivo.

Asegurando:

$$p_i^{inf} \leq p_i \leq p_i^{sup} \quad (21)$$

$$\sigma_{xf}^{inf} \leq \sigma_{xf} \leq \sigma_{xf}^{sup} \quad (22)$$

Donde:

p_i , p_i^{inf} , p_i^{sup} es la presión interna en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

σ_{xf} , σ_{xf}^{inf} , σ_{xf}^{sup} es el esfuerzo axial en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

La expresión (20) expresa la intención de buscar un compromiso razonable entre las funciones del adelgazamiento, el aplanamiento y las arrugas. Las expresiones (21) y (22) expresan la necesidad de que la presión interna del tubo y el esfuerzo axial se encuentren entre límites inferiores y superiores admisibles. El modelo (20) – (22) es resultado del análisis externo realizado, por lo que requiere ser identificado. Esta identificación, así como la determinación de los procedimientos complementarios que pudieran ser requeridos para completar la descripción del proceso, constituyen parte componente del análisis interno de la tarea.

2.9 El algoritmo utilizado

El algoritmo utilizado se puede observar en la figura 6.

```

Algoritmo seleccionado del método de Exploración en una red de
variables para la optimización matemática (del programa de
Tchebycheff.)
// introducir valores geométricos y mecánicos  $r, t, r, Y$  y
 $p_{imin}, p_{imax}, \sigma_{xfmin}, \sigma_{xfmax}$ 
// Definir
 $dp_i = p_{imax} - p_{imin} \quad 3$ 
 $d\sigma_{xf} = \sigma_{xfmax} - \sigma_{xfmin} \quad 3$ 
// Calcular
 $p_{i1} = p_{imin} + dp_i$ 
 $\sigma_{xf1} = \sigma_{xfmin} + d\sigma_{xf}$ 
 $p_{i2} = p_{imin} + 2dp_i$ 
 $\sigma_{xf2} = \sigma_{xfmin} + 2d\sigma_{xf}$ 
// Definir funciones  $f_t, f_p, f_w$  y pesos  $w_i$ 
 $f_t$  según ecuación (11)
 $f_p$  según ecuación. (13)
 $f_w$  según ecuación (17)
// Calcular en  $p_{i1}, p_{i2}, \sigma_{xf1}, \sigma_{xf2}$ 
 $f_t, f_p, f_w$ 
//Asignar valores deseados
 $f_{td}, f_{pd}, f_{wd}$ 
//Definir las diferencias relativas pesadas como funciones
 $drf_t = w_1 Abs f_t - f_{td}$ 
 $drf_p = w_1 Abs f_p - f_{pd}$ 
 $drf_w = w_1 Abs f_w - f_{wd}$ 

//Hacer mientras  $dp_i > 10E-3$ 
//Hacer hasta próximo  $\sigma_{xf}$ 
//Hacer hasta próximo  $p_i$ 
//Calcular funciones objetivo en
 $(p_{i1}, \sigma_{xf1}), (p_{i1}, \sigma_{xf2}), (p_{i2}, \sigma_{xf1}), (p_{i2}, \sigma_{xf2}),$ 
//Seleccionar Max  $z_{ij} = \text{Max}(drf_{tij}, drf_{pij}, drf_{wij})$ 
//Almacenar Max  $z_{ij}$ 
//Efectuar
//si  $i = 1$  y  $j = 1$ ;  $p_{imax} = p_{i2}$  y  $\sigma_{xfmax} = \sigma_{xf2}$ 
//si  $i = 1$  y  $j = 2$ ;  $p_{imax} = p_{i2}$  y  $\sigma_{xfmax} = \sigma_{xf1}$ 
//si  $i = 2$  y  $j = 1$ ;  $p_{imax} = p_{i1}$  y  $\sigma_{xfmax} = \sigma_{xf2}$ 
//si  $i = 2$  y  $j = 2$ ;  $p_{imax} = p_{i1}$  y  $\sigma_{xfmax} = \sigma_{xf1}$ 
//Fin si
//Fin si
//Fin si
//Fin si
//Definir nuevo intervalo  $dp_i, d\sigma_{xf}$ 
 $p_{i1} = p_{imin} + dp_i$  y  $p_{i2} = p_{imin} + 2dp_i$ 
 $\sigma_{xf1} = \sigma_{xfmin} + d\sigma_{xf}$  y  $\sigma_{xf2} = \sigma_{xfmin} + 2d\sigma_{xf}$ 
//Fin hacer
//Fin hacer
//Fin hacer
//Seleccionar el mínimo de los max  $z_{ij}$ 
//Extraer  $p_i$  y  $\sigma_{xf}$  del min de los max  $z_{ij}$ 
// Fin

```

Fig. 6. Algoritmo de optimización multi-objetivo

Y funciona de la siguiente manera: primeramente se

hace una partición de los intervalos de valores de las variables de decisión, tal como se ilustra en la figura 7.

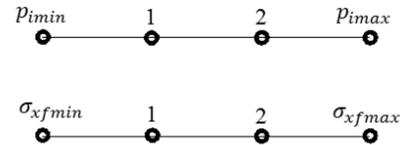


Fig. 7 Determinación de segmentos de los intervalos

Luego el software realiza los cálculos de las tres funciones f_t, f_p y f_w , como se plantea en las ecuaciones (11), (13) y (17), con los valores de las variables ubicados en los puntos 1,1; 1,2; 2,1 y 2,2 de los intervalos, obteniéndose así doce cálculos para la primera iteración, cuatro por cada función, se seleccionan y se guardan los valores máximos de cada función y luego se selecciona el mínimo de los máximos de las funciones, siendo en esa primera iteración la función óptima temporalmente (o mejor solución temporalmente). Entonces de acuerdo a la posición de la mejor función encontrada, se desechan dos segmentos de los intervalos, tal como se ilustra en la figura 8.

A continuación, el algoritmo hace una nueva partición de los dos segmentos que quedaron, en tres partes de una manera análoga al cálculo anterior, para la cual encuentra una nueva función óptima temporal y así sucesivamente hasta que el intervalo Δp_i ó $\Delta \sigma_{xf}$ se hace muy pequeño, por ejemplo 10^{-3} .

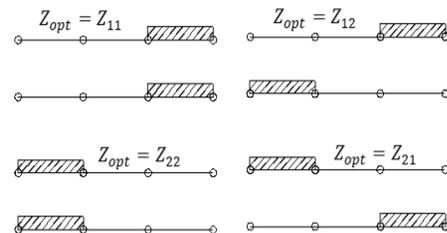


Fig. 8 Eliminación de segmentos de los intervalos

El valor de las variables de decisión en la última iteración, representa la posición final y representa la mejor solución o solución óptima y corresponden a las funciones óptimas o mejores soluciones, que son las más cercanas al espacio de existencia de los criterios.

2.10 Resultados de las corridas en el software *Mathematical@7* de las funciones objetivo.

En la figura 9 se observa que la función f_t mejora cuando la presión interna y la carga axial son mínimas. En la figura 10 se observa que la función f_p mejora con presión interna mínima y el esfuerzo axial máximo. En la figura 11 se puede observar que la función f_w mejora cuando la presión interna y el esfuerzo axial son máximos.

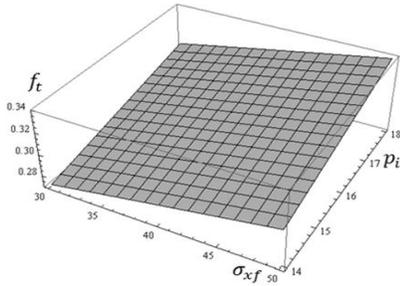


Fig. 9 Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (Acero AISI 1020)

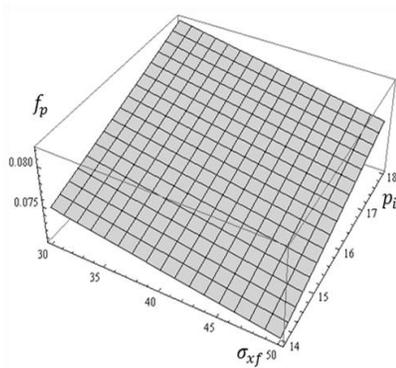


Fig. 10 Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (Acero 1020)

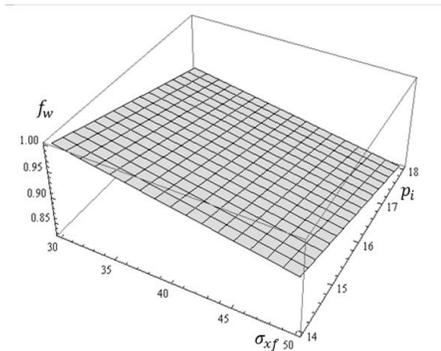


Fig. 11. Variación de f_w en función de p_i y σ_{xf} (Acero AISI 1020)

2.11 Resultados del modelo de optimización matemática por el método de exploración del programa de Tchebycheff implementado en el software Mathematical® 7

El modelo de optimización matemática se realizó según el método de exploración del programa de Tchebycheff implementado en el software MATHEMATICAL, en donde los intervalos de valores de las funciones objetivo f_i se dividen en tres segmentos iguales, cuatro puntos 1, 2, 3 y 4 de menor a mayor, a cada función se le asigna las letras i, j y k respectivamente, los valores $f_t d$, $f_p d$ y $f_w d$ ocupan las posiciones 1, 2, 3 y 4 eventualmente, resultando 18 com-

binaciones (ver tabla 2).

Tabla 2 Resultados de la optimización multiobjetivo para el tubo de acero AISI 1020

id	p_i [MPa]	σ_{xf} [MPa]	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	i	j	k
1	15,76	30,00	0,29	0,08	0,96	0,27	0,07	0,94	1	2	3
2	14,00	30,00	0,27	0,07	1,00	0,27	0,07	1,00	1	2	4
3	17,45	30,00	0,30	0,08	0,91	0,27	0,08	0,88	1	3	2
4	14,12	30,00	0,27	0,07	1,00	0,27	0,08	1,00	1	3	4
5	17,45	30,00	0,30	0,08	0,91	0,27	0,08	0,88	1	4	2
6	15,76	30,00	0,29	0,08	0,96	0,27	0,08	0,94	1	4	3
7	14,12	44,55	0,29	0,07	0,94	0,29	0,07	0,94	2	1	3
8	14,00	34,24	0,28	0,07	0,98	0,29	0,07	1,00	2	1	4
9	15,64	50,00	0,32	0,07	0,89	0,32	0,07	0,88	3	1	2
10	14,06	38,18	0,28	0,07	0,97	0,32	0,07	1,00	3	1	4
11	16,30	50,00	0,32	0,07	0,87	0,34	0,07	0,88	4	1	2
12	14,61	50,00	0,31	0,07	0,91	0,34	0,07	0,94	4	1	3
13	18,00	41,52	0,32	0,08	0,86	0,29	0,08	0,83	2	3	1
14	18,00	41,52	0,32	0,08	0,86	0,29	0,08	0,83	2	4	1
15	18,00	45,76	0,33	0,08	0,84	0,32	0,07	0,83	3	2	1
16	18,00	45,76	0,33	0,08	0,84	0,32	0,08	0,83	3	4	1
17	17,94	50,00	0,34	0,08	0,83	0,34	0,07	0,83	4	2	1
18	18,00	50,00	0,34	0,08	0,83	0,34	0,08	0,83	4	3	1

A todos los pesos se les asignó el valor unitario $w_i = 1/3$ y las expresiones $f_i O$ representan los valores óptimos de cada función objetivo para cada combinación de posiciones. Se puede observar en las primeras 6 corridas, en donde $f_t d$ ocupa la posición mínima, que los valores de p_i tienden a los valores medios y mínimos, σ_{xf} tiende hacia los límites mínimos independientemente de la posición de las demás $f_i d$. Se puede observar en las siguientes 6 corridas para cada material, en donde $f_p d$ ocupa la posición mínima, que los valores de p_i tienden a los medios y mínimos y σ_{xf} varía de mínimos a máximos dependientemente de la posición de las demás $f_i d$. En las últimas seis corridas en donde $f_w d$ ocupa la posición mínima, los valores de p_i toman los valores máximos y σ_{xf} tienden a tomar los valores medios y máximos dependientemente de la posición de las demás $f_i d$.

2.12 Diseño del experimento

Como ya se mencionó anteriormente en el proceso de doblado por arrastre intervienen, como variables de decisión, el esfuerzo axial y la presión interna aplicadas al tubo, las variables independientes de coordinación son el material (Y), espesor (t) y diámetro del tubo (D) y el radio del dado curvo (R). Y las variables dependientes o indicadores de eficiencia son las magnitudes del adelgazamiento, el aplamamiento y la formación de arrugas, tal como se muestra en la figura 12.

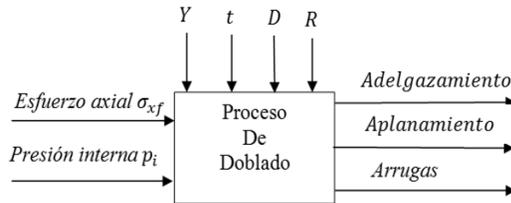


Fig. 12. Variables en el proceso de doblado

Para el análisis experimental se parte de datos obtenidos durante el proceso de doblado de tubos de material Acero AISI 1020 Steel, normalizado a 870°C de diámetro 25,4 mm, espesor de pared $t = 0,9$ mm, factor de pared $WF = 28$ y grado de doblado $DOB = 2$. (Esos dos últimos valores representan las condiciones críticas del doblado por ese método) (Hurtado, 2013)

Aquí se realiza un diseño factorial completo de dos factores (esfuerzo axial σ_{xf} y presión interna p_i) manteniendo las demás variables independientes constantes y tratando de disminuir los ruidos del proceso. Como variables respuesta se analizan; el aplanamiento, el adelgazamiento y la formación de arrugas, se realizan tres réplicas y cuatro pruebas, total doce experimentos, las corridas experimentales se realizaron aleatoriamente.

La cantidad de experimentos a realizar se establece según: $N = 2K$, donde se determinaron dos niveles (Valores mínimo y máximo de las cargas) y K factores (en este caso; esfuerzo axial σ_{xf} y presión interna p_i) y los resultados se pueden ver en las tablas 3, 4 y 5.

En las tablas 3, 4 y 5 la primera columna representa el número de experimentos, la segunda y tercera, los niveles máximos y mínimos de las variables de decisión esfuerzo axial σ_{xf} y presión interna p_i respectivamente, las columnas y_i representan los valores obtenidos en las tres réplicas, Y es la media y S_i^2 la varianza.

Tabla 3. Resultados experimentales en el adelgazamiento

Nro.	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	Y	S_i^2
1	-1	-1	1	0,2702	0,2778	0,2556	0,2679	0,0001
2	1	-1	-1	0,3029	0,3111	0,2889	0,3010	0,0001
3	-1	1	-1	0,3034	0,2889	0,3111	0,3011	0,0001
4	1	1	1	0,3390	0,3220	0,3556	0,3389	0,0003

Tabla 4. Resultados experimentales en el aplanamiento

Nr.	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	Y	S_i^2
1	-1	-1	1	0,0810	0,0828	0,0802	0,0813	0,000002
2	1	-1	-1	0,0748	0,0743	0,0767	0,0753	0,000002
3	-1	1	-1	0,0904	0,0910	0,0882	0,0899	0,000002
4	1	1	1	0,0829	0,0833	0,0914	0,0859	0,000023

Tabla 5. Resultados experimentales en las arrugas

Nro.	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	y_3	Y	S_i^2
1	-1	-1	1	3	2	3	2,67	0,333333
2	1	-1	-1	2	1	3	2,00	1,000000
3	-1	1	-1	1	0	2	1,00	1,000000
4	1	1	1	0	0	1	0,33	0,333333

2.13 Comparación entre los resultados teóricos y experimentales

Tabla 6. Determinación experimental de la diferencia entre las funciones de adelgazamiento experimentales y simuladas

Nro.	p_i MPa	σ_{xf} MPa	t_0 mm	A		B		$s^2 f_r$	$(A - B)^2$
				f_{rs}	f_{texp}	Xf_r	$s^2 f_r$		
1	14	30	0.66	0.27	0.27	0.27	0.0000	0.0000	
2	14	30	0.65	0.28	0.28	0.28	0.0000	0.0000	
3	14	30	0.67	0.26	0.26	0.26	0.0000	0.0000	
1	14	50	0.63	0.30	0.30	0.30	0.0000	0.0000	
2	14	50	0.62	0.31	0.31	0.31	0.0000	0.0000	
3	14	50	0.64	0.29	0.30	0.29	0.0000	0.0000	
1	18	30	0.63	0.30	0.30	0.30	0.0000	0.0000	
2	18	30	0.64	0.29	0.29	0.29	0.0000	0.0000	
3	18	30	0.62	0.31	0.31	0.31	0.0000	0.0000	
1	18	50	0.59	0.34	0.34	0.34	0.0000	0.0000	
2	18	50	0.61	0.32	0.32	0.32	0.0000	0.0000	
3	18	50	0.58	0.36	0.36	0.36	0.0000	0.0000	
suma							0.00007	0.00014	
suma/12							0.00001	0.00001	

G.L. del numerador (varianza de A-B)	$f_1 = 10$	$F_{10, 12, Model} = 2,00$
G.L. del denominador (varianza s)	$f_2 = 12$	$F_{10, 12, 95\%} = 2,75$
	$k = 1$	
	$m = 12$	

En las tablas 6 y 7 se muestra la comparación de los resultados teóricos según ecuaciones (11) y (13) y los ensayos experimentales para el adelgazamiento y aplanamiento. Además, se puede observar que las diferencias entre los resultados teóricos y experimentales para el adelgazamiento y aplanamiento son insignificantes lo cual se comprobó con la prueba de Fisher.

Tabla 7. Determinación experimental de la diferencia entre las funciones de aplanamiento experimentales y simuladas

Nro.	P _i MPa	σ _{xf} MPa	r ₀	r _{π/2}	r _π	C		D		Xf _D	s ² f _D	(C - D) ²
						f _{Dexp}	f _{Ds}	f _{Dexp}	f _{Ds}			
1	14	30	11.78	12.36	10.94	0.081	0.081	0.08	0.000000	0.000000		
2	14	30	11.76	12.37	10.96	0.082	0.082	0.08	0.000000	0.000000		
3	14	30	11.79	12.34	10.92	0.080	0.080	0.08	0.000000	0.000000		
1	14	50	11.63	12.40	11.33	0.075	0.075	0.07	0.000000	0.000000		
2	14	50	11.61	12.39	11.35	0.074	0.074	0.07	0.000000	0.000000		
3	14	50	11.64	12.42	11.32	0.077	0.077	0.08	0.000000	0.000000		
1	18	30	12.19	12.46	10.53	0.090	0.090	0.09	0.000000	0.000000		
2	18	30	12.20	12.47	10.51	0.091	0.091	0.09	0.000000	0.000000		
3	18	30	12.18	12.44	10.54	0.088	0.088	0.09	0.000000	0.000000		
1	18	50	12.07	12.57	11.03	0.083	0.083	0.08	0.000000	0.000000		
2	18	50	12.08	12.58	11.04	0.083	0.083	0.08	0.000000	0.000000		
3	18	50	12.05	12.65	11.01	0.091	0.091	0.09	0.000000	0.000000		
suma										0.000000	0.000000	
suma/12										0.000000	0.000000	

G.L. del numerador (varianza de A-B)	f ₁ =	10	F _{10, 12, Model} =	2,00
G.L. del denominador (varianza s)	f ₂ =	12	F _{10, 12, 95%} =	2,75
	k =	1		
	m =	12		

3 Conclusiones

1. El modelo de optimización desarrollado bajo criterios múltiples, permitió hallar un compromiso razonable entre los tres defectos principales inherentes al proceso de doblado de tubos por el método de arrastre (adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas), el modelo, se valida con la simulación del proceso de deformación y con resultados obtenidos en talleres de producción.
2. Se obtienen los valores de la presión interna y la carga axial correspondientes, que optimizan las funciones objetivos propuestas (adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas), para cada situación probable.
3. En la comparación del modelo matemático analítico desarrollado con los resultados experimentales se puede observar que hay una concordancia muy estrecha entre los resultados obtenidos por ambos métodos. La diferencia entre los valores teóricos y experimentales es despreciable. La validez de la data experimental para evaluar el adelgazamiento y aplanamiento así como la significación de las diferentes variables quedó corroborada por la prueba de Fisher.
4. La utilización del modelo de optimización propuesto permite la mejora de la calidad de los productos terminados mediante el establecimiento de las tensiones correspondientes a las funciones optimizadas para cada caso específico, con el objetivo de minimizar los defectos que se producen en el proceso de doblado de tubos por arrastre.

Referencias

Achimas G, V.A. C, L. L y Groze.F, 2007, Experimental Research Concerning the Influence of the Bending Radius

on the Wall Thickness of the Bent Pipes, microCAD, pp. 7-11.

Agarwal R, 2004, Tube Bending With Axial Pull and Internal Pressure, Master of Science, Mechanical Engineering, Bangalore University, India.

Arzola JR, 2000, Sistemas de Ingeniería, 1ra ed., La Habana, Editorial Felix Varela.

Ceclan VA, Achimas G, Lazarescu L y Groze F, 2007, Influence of the internal pressure on the change of the wall thickness in the case of tubes subjected to bending.

CMLUSA, 2010, CML USA, Inc. Manufacturer of Tube, Pipe & Profile Bending Machinery. Se encuentra en <http://www.ercolina-usa.com/tubing-benders.htm>, Fecha de consulta: mayo 2011.

Duncan JL, Marciniak Z y Hu SJ, 2002, Mechanics of Sheet Metal Forming, 2 ed., Butterworth-Heinemann

Hurtado J, 2013, Optimización multiobjetivo de los parámetros que intervienen en los procesos de doblado de tubos cilíndricos metálicos por el método de arrastre, Doctorado, Doctor en Ciencias Técnicas, Mecánica, Universidad de Holguín.

Hurtado JL, Márquez OM, Milán RS y Ruiz JA, 2012a, Análisis y Síntesis de la Planeación para la Fabricación del Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre.

Hurtado JL, Márquez OM, Milán RS y Ruiz JA, 2012b, Determinación de la Relación entre la Presión Interna y la Holgura entre Mandril y Diámetro Interno del Tubo en el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre.

Hurtado JL, Milán RS y Ruiz JA, 2011a, Análisis y síntesis de la tarea de planeación para la fabricación del proceso de doblado de tubos por arrastre como tarea de preparación y toma de decisiones bajo criterios múltiples.

Hurtado JL, Milán RS y Ruiz JA, 2012c, Determinación de los Intervalos de las Variables de Cargas en el Proceso De Doblado de Tubos por Arrastre.

Hurtado JL, Moya J y Cárdenas J, 2011b, Influencia de los Parámetros Geométricos y de Carga en los Defectos que Ocurren en el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre, Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad del Zulia, Vol. 34

Hurtado JL, Santana R y Padrón S, 2011c, Análisis de la Deformación Plástica en el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre.

Hurtado JL, Santana R y Padrón S, 2012d, Estudio del comportamiento elastoplástico en el proceso de doblado de tubos por arrastre, Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad del Zulia, Vol. 35, pp. 11- 19.

MatWeb, 2013, AISI 1020 Steel , normalized at 870°C Se encuentra en <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2740581369f3421dac0d8c91294b5935>, Fecha de consulta: febrero 2013.

Strano M, 2005, Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes, International Journal of Advantages of Manufacturing Technologies, Vol. 26, pp. 733-740.

Tracto-Technik, 2009, Tracto-Technik Automated Fabrica-

tion of Template Pipes. Se encuentra en <http://pipebending.tracto-technik.com/index.cfm?linkArticleID=32>, Fecha de consulta: diciembre 2011.

Wang J y Agarwal R, 2006, Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* Vol. 128, pp. 598-605.

Wang X y Cao J, 2001, Wrinkling Limit in Tube Bending, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 123, pp. 430-435.

Yang H y Lin Y, 2004, Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 152 pp. 363-369.

Recibido: 26 de julio de 2012

Revisado: 25 de noviembre de 2012

Hurtado Ortega, Jorge Luis: Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Técnicas, Especialidad: Producción y Explotación de Máquinas. Especialista en Diseño y Mantenimiento Industrial. Doctorado en CAD CAM. Profesor asociado del Dpto. de mecánica de la Universidad Politécnica Territorial de Aragua, UPTA.

Santana Milán, Raúl: Ingeniero Mecánico, Especialista en diseño de herramientas para la conformación de metales asistido por computadoras, Doctor en Ciencias Técnicas. Correo electrónico: rsmilan2000@yahoo.com.

Ruiz, José Arzola: Ingeniero Metalúrgico, Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" CUJAE. Correo electrónico: jararzola@mecanica.cujae.edu.cu.

