

Determinación de los niveles de flexibilidad y resistencia de los materiales en una máquina dobladora de tubos

Paul Caza¹; Rodrigo Díaz²; Ángel Franco³; Patricio Cruz⁴

¹Mecánica Industrial, Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito, Ecuador, paul.caza@istvidanueva.edu.ec

²Mecánica Industrial, Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito, Ecuador, rodrigo.diaz@istvidanueva.edu.ec

³Mecánica Industrial, Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito, Ecuador, angel.franco@istvidanueva.edu.ec

⁴Mecánica Industrial, Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito, Ecuador, patricio.cruz@istvidanueva.edu.ec

Resumen: El siguiente trabajo contiene el desarrollo del diseño y la construcción de una curvadora de tubería hidráulica redonda que se pliega entre 0° y 180°. Se tomó la decisión de construir la máquina de doblar para aplicar los diferentes conocimientos adquiridos al perseguir carreras tecnológicas en mecánica industrial. El proyecto incluye un marco teórico que orienta al lector sobre el tema del doblado de tuberías, y sobre los métodos y máquinas de doblado que existen en el mercado. También contiene el diseño y la verificación de las piezas principales de la máquina, dibujos de todas las piezas, y fotos del montaje de las piezas reales y un manual de operación y mantenimiento de la máquina. Finalmente, se incluyen recomendaciones y conclusiones basadas en los resultados obtenidos en el proceso de fabricación de la máquina.

Palabras Clave: flexibilidad, resistencia, materiales, dobladora.

Determination of the flexibility and resistance levels of materials in a tube bending machine

Abstract: The following work contains the development of the design and construction of a hydraulic pipe bending machine round that folds between 0° and 180°. The decision was made of constructing the bending machine to apply the different knowledge acquired when pursuing technology careers in Industrial mechanics. The project includes a theoretical framework that Orientation to the reader about the topic of pipe bending, and about bending methods and machines that exist in the market.

It also contains the design and verification of the main machine parts, drawings of all parts, and photos of the assembly of the actual parts and an operation manual and machine maintenance.

Finally, recommendations and conclusions are included based on the results obtained regarding the manufacturing process of the machine and the quality of the folds obtained, which can be of great help for those who decide to resume this project or build a bender of this type.

Keywords: flexibility, strength, materials, bending machine.

I. INTRODUCCIÓN

El término conformado de metales se refiere a un conjunto de procesos que utilizan la deformación plástica de metales y aleaciones metálicas para producir piezas mecánicas de variadas formas mediante el moldeo del metal. Durante estos

procesos el material es sometido a una deformación plástica que permite que el cambio de forma sea permanente.

Cuando estos procesos se realizan a temperaturas menores a la de recristalización se dice que el metal ha sido trabajado en frío. Las ventajas del trabajo en frío son una mejora en la resistencia, mayor exactitud dimensional, mejoramiento de la maquinabilidad, y mejor acabado superficial.

Para las operaciones de doblado de tubos en frío existen una gran variedad de máquinas que

1. paul.caza@istvidanueva.edu.ec
2. rodrigo.diaz@istvidanueva.edu.ec
3. angel.franco@istvidanueva.edu.ec
4. patricio.cruz@istvidanueva.edu.ec

utilizan diferentes métodos entre los más modernos están la tecnología de conformado incremental, que puede efectuar cualquier tipo de doblez en 3D, a la vez que puede reducir el diámetro del tubo logrando gran reproducibilidad y precisión dimensional.

Por otro lado, están las máquinas que utilizan procesos de conformado por arrastre en las cuales el tubo es empujado a través de una herramienta de curvado fija y una matriz con movimiento. Las principales desventajas de este proceso son una alta recuperación elástica, requiere de fuerzas elevadas para lograr el doblez y sobretodo las deformaciones que se producen en la sección del tubo son difíciles de controlar porque hay bastante fricción entre la matriz y la herramienta curvadora, esto hace que el proceso resulte poco fiable.

Aunque con el conformado incremental se obtienen mejores resultados el costo de la maquinaria hace que se sigan utilizando los procesos tradicionales como el de arrastre, y se trate en lo posible de disminuir las fallas que se puedan producir. Con este propósito se emprendió en la construcción de una máquina curvadora hidráulica con la que se tengan buenos resultados a un menor costo.

DOBLADO Y CURVATURA DE MATERIALES

El conformado mecánico se considera como la deformación plástica de los materiales en general, sin embargo, la presente investigación analizará los materiales con bajo contenido de carbono (acero, hierro).

INTRODUCCIÓN AL DOBLADO Y CURVADO

El doblado y curvado son operaciones que consisten en obtener una pieza de chapa, alambre o tubos, con generatrices y bordes rectilíneos o curvos, sometiendo al material a grandes desplazamientos moleculares en el transcurso de la operación. En algunos textos se refieren a doblado cuando el doblez se hace en ángulo vivo o con radio muy pequeño y a curvado cuando el

doblez tiene gran radio, pero en la práctica diaria general se denomina doblado a cualquiera de los dos procedimientos.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DOBLADO

Elasticidad del material: Influye en la recuperación del material, por lo que es necesario acentuar los ángulos de doblado.

Radio de curvatura: Influye en la variación de espesor de forma decisiva e incluso en la aparición de grietas y posteriores roturas. Por lo que se debe evitar dobleces sin radio (en arista viva).

FENÓMENOS QUE SE PRODUCEN EN EL DOBLADO

En el proceso de doblado del tubo la chapa se comprime por su parte interior y se estira por la exterior. En consecuencia, las fibras del material sufren en la zona de doblado, unas solicitaciones tanto más intensas cuanto menor sea el radio que se pretenda conseguir, de ahí el concepto de radio mínimo.

Denominaremos radio mínimo al radio interior más pequeño que se puede lograr para un material determinado.

Los radios mínimos recomendados son:

1 a 2 veces el espesor del material, para materiales blandos.

3 a 4 veces el espesor del material, para materiales duros.

Teniendo presente que el material se estira por el exterior y se comprime por su parte interior cuando es doblado, debe existir forzosamente una zona interna donde las tensiones sean nulas y no exista deformación, a esa zona se le llama fibra, o línea neutra.

La línea neutra nos señala el cambio de sentido de las solicitaciones, ya que esa línea no sufre deformación alguna.

DETERMINACIÓN DE LA FIBRA NEUTRA

Si se considera que la fibra neutra es la zona de un elemento doblado que no sufre ninguna deformación, sus fibras no se modifican como

consecuencia de las fuerzas de tracción o compresión a las que está sometido el material al ser doblado.

Éste fenómeno solo se produce en las zonas en que en mayor o menor medida la pieza va doblada, puesto que en las zonas planas o sin dobladas las fibras permanecen inalterables antes, durante y después del doblado.

Dicha situación no siempre se encuentra en el centro exacto de la chapa, sino que toma una posición diferente, según el espesor del material y el radio de doblado.

El cálculo de la fibra neutra es básico en el desarrollo de los elementos doblados.

Otro fenómeno importante, que se produce en el doblado, es la recuperación elástica del material, que se refiere a su tendencia a recuperar la forma primitiva. Es necesario evaluar esta recuperación a través de ensayos previos, para tenerla en cuenta en el momento de proyectar las matrices de doblado, las cuales tienen una deformación inicial superior a la deseada, para compensar la posterior recuperación elástica del material.

Se llama factor de retorno o recuperación elástica, al valor que el material tiende a recuperarse tan pronto como cesa la acción deformadora, a la que ha estado sometido. Éste fenómeno se debe a la propiedad que poseen los cuerpos de ser elásticos. La recuperación elástica varía en función de los siguientes factores:

El tipo de material. En un ensayo a tracción se puede comprobar cómo en función del material los diagramas de deformaciones son distintos. Por ejemplo, un acero duro tiene mayor recuperación elástica que un acero con bajo contenido de carbono.

El espesor del material. A mayor espesor, menor recuperación elástica.

El radio de curvatura. A mayor radio, mayor recuperación elástica.

El ángulo de doblado

TÉCNICAS PARA DOBLADO DE TUBOS

Las técnicas usadas comúnmente para doblar tubos son: doblado por estiramiento, doblado a tracción, doblado por compresión, doblado en

prensa, doblado por rodillos y extrusión por rodillos.

DOBLADO A TRACCIÓN

El tubo se tracciona desde ambos extremos mientras se dobla sobre un bloque formador.

Esta técnica está limitada a dobleces de radio grandes, pero es más apropiado para curvas que no son circulares.

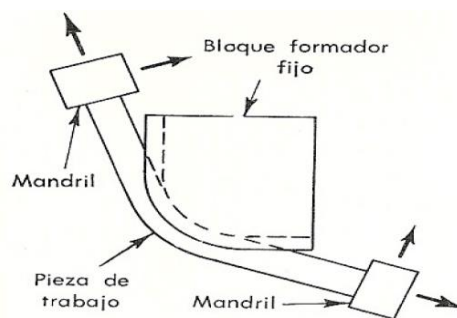


Fig. 1 Dobladora a tracción

DOBLADO EN PRENSA

Se crea una curva presionando un dado formador sobre el tubo en un movimiento. El tubo es soportado por un par de dados separados, que rotan a medida que el conformador se mueve hacia el centro empujando el tubo.

Este movimiento envuelve el tubo alrededor del conformador, permitiendo que los dados de los extremos apoyen el tubo en cada lado.

Este proceso es muy rápido y es excelente para altas producciones. Sin embargo, se deben cambiar los dados o la distribución de los mismos para generar diferentes variedades de curvas.

El radio de curva máximo con este método es 110 grados.



Fig. 2 Doblado en prensa

DOBLADO CON RODILLOS

Esta técnica utiliza tres dados cilíndricos para formar la curva. Este estilo de doblado se utiliza típicamente para desarrollar curvas grandes de radio y para enrollar tubería (serpentines).

La curva se crea cuando el dado de centro superior de la curva se mueve ajustándose al tubo, mientras que los dos dados, izquierdo y derecho, más bajos de la curva, rotan al mismo tiempo en una dirección y posteriormente en la dirección contraria al momento requerido.

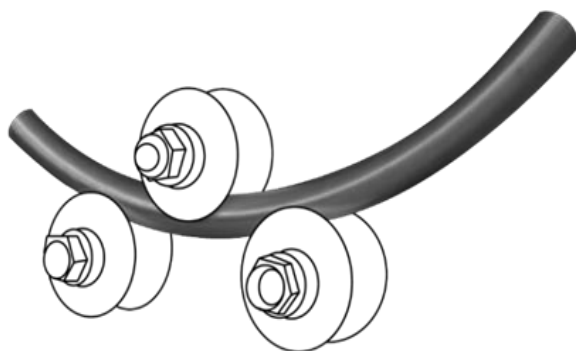


Fig. 3 Doblado con rodillos

DOBLADO POR EXTRUSIÓN DE RODILLOS

Se hace girar dentro del tubo un cabezal con rodillos de empuje anchos situados por un lado y un rodillo de trabajo angosto por el otro lado.

El tubo se rodea con anillos de trabajo en el exterior del cabezal. El rodillo de trabajo es desplazado hacia adentro y afuera por medio de levas mientras gira el cabezal con el fin de aplicar presión para extruir metal en la pared del tubo lateralmente, para obligarlo a doblarse.

A medida que se trabaja el material se hace avanzar el tubo pasando por el cabezal.

Esta técnica se utiliza para doblar tubos mayores a 5 pulgadas (127mm) de diámetro exterior y con espesores mayores a 5/8 de pulgada (15.8mm).

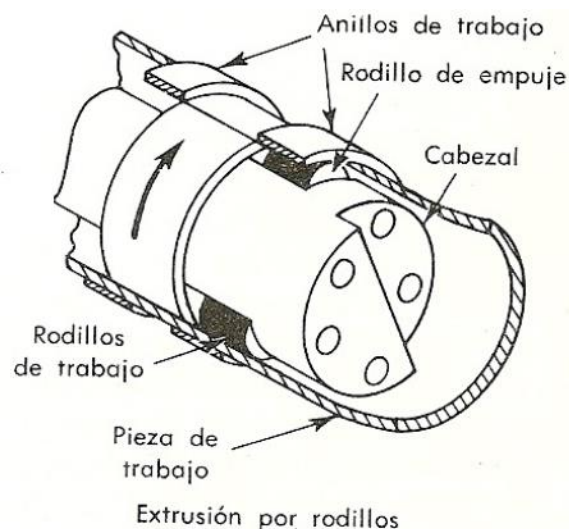


Fig. 4 Doblado por extrusión de rodillos

DOBLADO POR ESTIRAMIENTO (ARRASTRE)

En este método, la pieza de trabajo se sujeta contra un dado que tiene la forma del doblado, como en el doblado por compresión; pero ahora el dado gira jalando la pieza de trabajo por una matriz de presión y, en muchos casos, sobre un mandril, como se muestra en la figura.

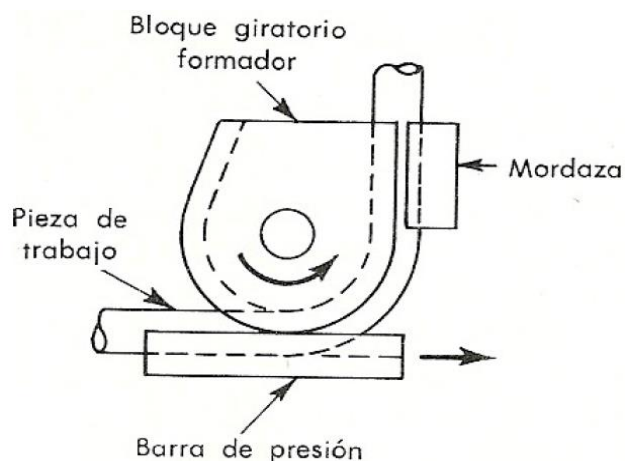


Fig. 5 Doblado por estiramiento

Durante el proceso de doblado se inserta un mandril, que es una herramienta usada para apoyar el interior del tubo y así mejorar la calidad de la curva. Este mandril reduce al mínimo el aplanado, y ayuda a controlar el arrugado durante el doblado.

El radio de curvatura máximo utilizando este método es de 180°.

LA DOBLADORA A FABRICAR

Luego de analizar los diferentes métodos de doblado y de investigar las distintas máquinas dobladoras hidráulicas disponibles en el mercado, se determinó que el mejor método para realizar el doblado era el método por estiramiento, ya que es el que más se adapta a nuestras necesidades y por otro lado nos brinda la posibilidad de realizar curvas de hasta 180°.

ESQUEMA DE LA DOBLADORA A FABRICAR

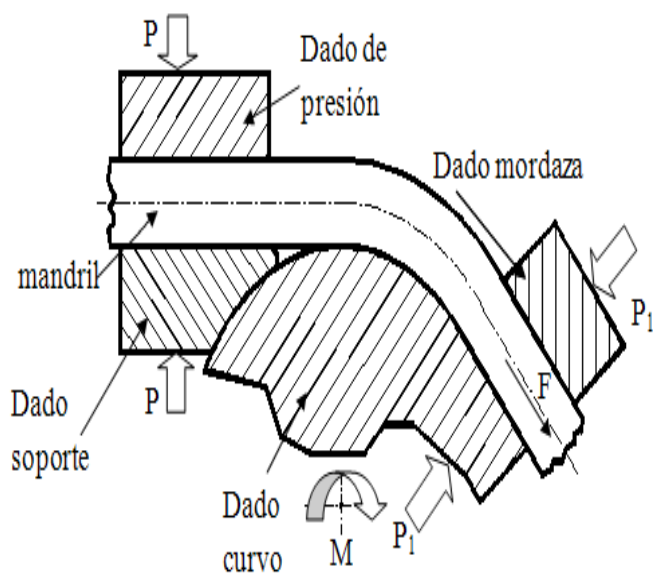


Fig. 6 Dobladora por estiramiento

CÁLCULO DE FUERZAS EN EL MECANISMO

Los tubos que se doblarán serán tubos redondos, entre ellos los que generalmente se usan son tubos para muebles que cumplen con Norma ASTM 500 grado A.

Como se curvarán tubos de diferentes diámetros, se determinará la carga necesaria para deformar el tubo con el diámetro y grosor máximo que va a doblar la máquina en este caso es de 2½" (63,5mm de diámetro externo) y 1,5mm de grosor del tubo. Los datos de los tubos que son necesarios para los cálculos se han tomado de las siguientes tablas:

TABLA I
Tubería estructural negra redonda Catalogo Dipac 2017

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas					
Diámetro Exterior	Espesor			Flexión					
				Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro			
D		e	A	P	I	W	i		
pulg.	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm		
1/2	12,70	0,60	0,23	0,18	0,04	0,07	0,43		
		0,75	0,28	0,22	0,05	0,08	0,42		
		0,90	0,33	0,26	0,06	0,09	0,42		
		1,10	0,40	0,31	0,07	0,11	0,41		
5/8	15,88	0,60	0,29	0,23	0,08	0,11	0,54		
		0,75	0,36	0,28	0,10	0,13	0,54		
		0,90	0,42	0,33	0,12	0,15	0,53		
		1,00	0,47	0,37	0,13	0,16	0,53		
		1,10	0,51	0,40	0,14	0,18	0,52		
		1,50	0,68	0,53	0,18	0,22	0,51		
		3/4	19,05	0,60	0,35	0,27	0,15	0,16	0,65
				0,75	0,43	0,34	0,18	0,19	0,65
0,90	0,51			0,40	0,21	0,22	0,64		
1,00	0,57			0,45	0,23	0,24	0,64		
		1,10	0,62	0,49	0,25	0,26	0,64		
		1,50	0,83	0,65	0,32	0,34	0,62		
		7/8	22,23	0,60	0,41	0,32	0,24	0,21	0,77
				0,75	0,51	0,40	0,29	0,26	0,76
0,90	0,60			0,47	0,34	0,31	0,75		
1,10	0,73			0,57	0,41	0,37	0,75		
		1,50	0,98	0,77	0,53	0,47	0,73		
		1	25,40	0,60	0,47	0,37	0,36	0,28	0,88
				0,75	0,58	0,46	0,44	0,35	0,87
				0,90	0,69	0,54	0,52	0,41	0,87
1,00	0,77			0,60	0,57	0,45	0,86		
		1,10	0,84	0,66	0,62	0,49	0,86		
		1,50	1,13	0,88	0,81	0,64	0,85		
		1 1/4	31,75	0,75	0,73	0,57	0,88	0,55	1,10
				0,90	0,87	0,68	1,04	0,65	1,09
1,10	1,06			0,83	1,25	0,78	1,08		
1,50	1,43			1,12	1,63	1,03	1,07		
1 1/2	38,10	0,90	1,05	0,83	1,82	0,96	1,32		
		1,10	1,28	1,00	2,19	1,15	1,31		
		1,50	1,72	1,35	2,89	1,52	1,30		
		1 3/4	44,45	1,00	1,37	1,07	3,22	1,45	1,54
1,10	1,50			1,18	3,52	1,58	1,53		
1,50	2,02			1,59	4,67	2,10	1,52		
1 7/8	47,68			1,00	1,47	1,15	4,00	1,68	1,65
		1,10	1,61	1,26	4,37	1,83	1,65		
		1,50	2,18	1,71	5,81	2,44	1,63		
		2	50,80	1,10	1,72	1,35	5,31	2,09	1,76
1,50	2,32			1,82	7,06	2,78	1,74		

TABLA II
Propiedades mecánicas de los aceros. Bustamante H (2010)

Norma ASTM A 500 Grado del Acero	Propiedades Mecánicas (mínimas)				
	Límite de Fluencia Mpa	Límite de Fluencia psi	Resistencia a la Tracción Mpa	Resistencia a la Tracción psi	% Elongación
A	228	33000	310	45000	25
Circular B	290	42000	400	58000	23
C	317	46000	427	62000	21

Para doblar el tubo es necesario aplicar una fuerza tal que genere un esfuerzo mayor que el esfuerzo de fluencia del material, para que haya deformación plástica.

La ecuación para calcular el esfuerzo de flexión es la siguiente:

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

CÁLCULO DEL MOMENTO AXIAL DE INERCIA DEL TUBO A DOBLAR

Para calcular el momento axial de inercia se tiene la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\pi}{64} (\phi_e^4 - \phi_i^4)$$

$$I = 0,049 [(6,35)^2 - (6,05)^2]$$

$$I = 14,02 \text{ cm}^4$$

Para el cálculo de la distancia desde el eje neutro hasta el punto donde de aplicación del esfuerzo se aplica la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\phi_e}{2}$$

$$C = \frac{2,54}{2}$$

$$C = 3,175 \text{ cm}$$

Para el cálculo de la fuerza de doblez, se utilizan las características del material del tubo a doblar. En este caso, el acero requerido es el A36, el cual tiene un esfuerzo de fluencia de aproximadamente 250 Mpa con lo cual:

$$A = \frac{\pi}{4} (De^2 - Di^2)$$

$$A = 0,78 [(6,35)^2 - (6,05)^2]$$

$$A = 2,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = A \cdot \sigma$$

$$F = (2,9 \times 10^{-4}) (250 \times 10^6)$$

$$F = 72500 \text{ N}$$

La barra tiene una distancia entre los apoyos de 20 cm y su longitud es de 1,30 m aproximadamente, para el cálculo respectivo se aplica:

$$M_{par} = F \cdot L$$

$$M_{par} = 72500 \text{ N} \cdot 130 \text{ cm}$$

$$M_{par} = 9425000 \text{ Ncm}$$

$$M_{par} = 942,5 \text{ Pa}$$

$$M_{flexion} = F \cdot L$$

$$M_{flexion} = 72500 \text{ N} \cdot 20 \text{ cm}$$

$$M_{flexion} = 1450000 \text{ N cm}$$

$$M_{flexion} = 145 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la primera fórmula obtenemos:

$$\sigma = \frac{MC}{I}$$

$$\sigma = \frac{(1450000)(3,175)}{14,2}$$

$$\sigma = 328370,1854 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma = 3,28 \text{ GPa}$$

Ahora se determina el esfuerzo cortante

$$\tau_{max} = 1,5 \frac{V}{A}$$

$$\tau_{max} = 0,375 \text{ GPa}$$

Se define el esfuerzo mediante la formula

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_{max})^2 + 3(\tau_{max})^2}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(3,28)^2 + 3(0,375)^2}$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{10,7584 + 0,421875}$$

$$\sigma_{VM} = 3,34 \text{ GPa}$$

El formado de metales comprende un grupo amplio de procesos o métodos de manufactura, mediante los cuales se puede dar la forma deseada a una pieza de material, sin cambiar su masa o composición química. Existen varios criterios técnicos para clasificar los procesos de conformado. Los utilizados con mayor frecuencia son los siguientes: 1) por la temperatura a la que se realizan, 2) por el tamaño de la materia prima y 3) por los tipos de esfuerzos empleados para dar forma al metal (Lange, 2014).

De acuerdo a la temperatura los procesos se clasifican en: a) formado en caliente, b) formado en frío, y c) formado en tibio; esta última categoría de desarrollo es relativamente reciente, incluye los procesos de conformado de aceros que se realizan a una temperatura intermedia entre caliente y frío. (Vázquez, 2015). Los procesos de deformación en frío son generalmente realizados a temperatura ambiente, el límite superior de temperatura para el caso de aceros bajo carbono es de 200 °C, arriba de esta temperatura hace su aparición la fragilidad debida al envejecimiento.

En los procesos de deformación en frío, el metal endurece por deformación, y por eso es necesario aplicar una fuerza mayor, por tanto, se consume una mayor energía que en el conformado en caliente. Este endurecimiento es el resultado de la interacción de unas dislocaciones con otras, o con obstáculos tales como partículas de segunda fase, inclusiones, límites de grano. A deformaciones pequeñas se forman marañas de dislocaciones, al aumentar la deformación las dislocaciones se ordenan y forman celdas en el interior de los granos cristalinos; las paredes de las celdas están constituidas por concentraciones de dislocaciones (Langford y Cohen, 2015). La densidad de dislocaciones de un metal deformado en frío es del orden de 10^{13} cm⁻² (McQueen y Jonás, 2015). Las celdas alcanzan un tamaño que permanece constante al aumentar la deformación.

La estructura de los metales deformados consta de granos cristalinos fuertemente alargados, que contienen en su interior celdas equiaxiales es de tamaño constante. Cuando el proceso es realizado en frío, las formas producidas tienen una mayor

precisión dimensional, mejor acabado superficial y mayor resistencia mecánica por endurecimiento del material respecto de las obtenidas por formado en caliente. (Vázquez, 2015).

Las curvas de esfuerzo deformación que caracterizan a los materiales metálicos tienen un tramo inicial de la curva que generalmente es recto y da la información sobre el comportamiento elástico del material, es decir, entre la relación entre esfuerzos y deformaciones cuando estas son recuperables. La pendiente del tramo inicial de la curva, que se conoce como módulo elástico o módulo de Young, es una medida de la rigidez del material, es decir de dos piezas idénticas pero fabricadas con distintos materiales, aquella con mayor modulo será la que presente menores deformaciones.

El límite elástico es la tensión mínima que hay que aplicar para que aparezcan deformaciones permanentes en el material. En la gran mayoría de ocasiones las piezas se calculan para que no sufran deformaciones permanentes y en consecuencia se debe garantizar que las tensiones que actúan no superen el límite elástico. (Blázquez y Vicente 2014).

En el caso de los aceros de bajo contenido de carbono luego de la zona elástica esta una zona de transición (llamada de fluencia) se caracteriza por un elevado esfuerzo inicial al que sigue una importante disminución del mismo.

Seguidamente, la deformación continúa aumentando sin que el esfuerzo aumente significativamente, aunque con ciertas oscilaciones hasta comenzar la zona de deformación plástica. (Montes, Cuevas y Cintas, 2014). En nuestro caso lo que buscamos es precisamente superar el límite elástico del material e ingresar en la zona plástica para lograr la cedencia del material y que este adquiera la forma requerida. Dentro del conformado de metales encontramos varios procesos de manufactura que usan la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas.

Para realizar la deformación del tubo, se requiere del uso de un dado, el cual, se utiliza para aplicar

un esfuerzo que excede la resistencia a la fluencia del metal. De esta manera, el metal se deforma tomando la forma determinada por la geometría del dado. Por lo expuesto, este artículo tiene como objetivo analizar los niveles de deformación en los tubos de acero, validando estudio a través de la hipótesis del conformado mecánico.

Cuando hablamos de doblar un tubo es obvio que debemos de utilizar una máquina dobladora de tubo para realizar dicho procedimiento, ahora bien, en el doblado del tubo se habla de un proceso de conformación en frío el cual que produce una curva permanente de acuerdo con la forma de una matriz, conservando al mismo tiempo la forma de la sección transversal del caño, ya esta sea redondeada, cuadrada, rectangular o extrudida.

En la dobladora de tubos utiliza un cilindro hidráulico para doblar tubos de acero de grosor considerable. La fuerza necesaria para doblar los tubos es de 40.000 N en los 500 mm en los que el cilindro desplaza la matriz curva. El proceso de doblado debe durar 12 segundos para conseguir un rendimiento óptimo respecto a las propiedades del tubo doblado y la productividad de la máquina.

Actualmente disponemos de una gran variedad de máquinas dobladoras de tubo que varían desde tamaños pequeños de banco o con trípode, las cuales son operados manualmente o a pedal, hasta sofisticada maquinaria industrial completamente automatizada que cuenta con control.

Procedimiento. - La matriz de doblado o de flexión, es la que constituye el elemento principal del proceso de doblado, ya que este procedimiento es cuando se moldea el tubo con un determinado radio de curvatura. La misma está constituida por dos partes que poseen una acanaladura central, cuya profundidad es generalmente la mitad del diámetro del tubo.

Esas partes son:

La matriz de sujeción o de anclaje, como su nombre lo indica es la que cumple la función de sujetar el tubo y se emplea conjuntamente con la

matriz de doblado. Su longitud coincide con la parte de sujeción de la matriz de doblado y sostiene al tubo durante la flexión. Su tamaño dependerá del tamaño del tubo y del radio de doblado.

La matriz de presión o de seguimiento, tiene como función ser la herramienta de contención durante el doblado y su longitud depende del grado de flexión y del radio de la línea media. La misma proporciona una presión constante sobre el tubo y lo sigue a lo largo de todo el proceso de doblado.

Ahora bien los dos elementos que les nombraremos a continuación no se encuentran presentes en todas las dobladoras de tubo, particularmente las más antiguas, las de tamaño pequeño o las de accionamiento manual, pero es bueno acotar que las máquinas que los incorporan logran mucha mejor precisión y calidad del producto terminado.

El mandril, cuando hablamos de él nos referimos al elemento que proporciona apoyo en el interior del tubo. Su forma y el material con el que está construido dependen del diámetro exterior y del espesor de pared del tubo. Su función principal es la de evitar que el tubo sufra deformaciones o arrugas.

La matriz de deslizamiento tiene como función principal evitar la aparición de arrugas en el tubo durante el proceso de doblado por esto trabaja conjuntamente con el mandril y se hace necesaria cuando la resistencia del tubo a la compresión es muy alta. Al igual que el mandril, esta pieza se encuentra en un estado de constante fricción con el tubo, por lo que debe ser lubricada frecuentemente.

Este documento de investigación es una guía de formato o plantilla que puede compararse con otras versiones técnicas de maquinaria hidráulica semejantes.

Para la comprobación de las características de la maquina se tomaron medidas de velocidad de

doblado, y del estiramiento del material, además de verificar la calidad de doblado. Los resultados se muestran en las tablas I y II.

TABLA III

Tiempos de doblado

TUBO NEGRO REDONDO						
No.	DIÁMETRO INICIAL	LONGITUD INICIAL	CÉLULA INICIAL	DIÁMETRO FINAL	LONGITUD FINAL	CÉLULA FINAL
1	34	131,8	3,18	33	132,8	3
2	38,1	147,5	1,15	34	148,5	1,05
3	50,6	150	1,9	42,8	151	1,69
4	51,13	116	2,16	45,6	116,5	1.7

TABLA IV

Calidad del doblez

TUBO NEGRO REDONDO																	
No.	DIÁMETRO INICIAL	ÁNGULO DE LA CURVATURA				TIEMPO DE DOBLADO (s)				CALIDAD DEL DOBLEZ							
		30°	45°	60°	90°	30°	45°	60°	90°	30°		45°		60°		90°	
										SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO
1	34	x	x	x	x	4,24	6,31	9,14	16,4	X		X		X		X	
2	38,1	x	x	x	x	5,23	8,2	12,5	19,7	X		X		X		X	
3	50,6	x	x	x	x	4,39	7,46	12,8	20			X		X			X
4	51,13	x	x	x	x	4,78	7,34	12,4	18	X		X		X			X

en caliente, que al pasar por una serie de rodillos sufren un proceso de formado en frío dando la geometría de cada perfil (circular, cuadrado o rectangular). Para el caso de los perfiles tubulares, el cerrado se hace mediante soldadura por resistencia eléctrica.

Especificaciones de la tubería circular. Las propiedades mecánicas de los materiales como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima a la tensión y el porcentaje de elongación, entre otras, son determinantes al momento de elegir entre un material u otro. Los valores de las propiedades mecánicas para perfiles circulares en acero estructural que se pueden obtener de la norma ASTM A513 o NTC 2842

Fuente: (Norma ASTM A513, p. 972)

El diámetro y el espesor también son características de gran importancia a la hora de seleccionar un tubo. Este tipo de tubería se fabrica según normas ASTM A 513, 10 NTC 2842 u otra equivalente.

FUNDAMENTOS DEL DOBLADO DE METALES

TUBOS DE ACERO

Los tubos de acero son la materia prima elemental en la industria manufacturera; se usan para ensamblar una gran cantidad de productos como redes para la conducción de fluidos, energía y telecomunicaciones, transporte de materiales industriales, fabricación de maquinaria y aplicaciones en el medio urbano como estructuras de techos, escaleras, pasamanos y carrocerías, entre otros usos.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TUBERÍA ESTRUCTURAL

Los perfiles de tubería estructural se fabrican con acero laminado en caliente (HR) de bajo contenido de carbono, alta soldabilidad y ductilidad, según normas ASTM A513 o cualquier otro acero equivalente.

Proceso de producción. Los perfiles estructurales se fabrican partiendo de bandas de acero laminado

El doblado de metales es un proceso que ocurre al aplicarle a un metal de superficie recta esfuerzos superiores al límite elástico o punto de cedencia, en una dirección diferente al eje neutral del material, así se consigue una deformación plástica permanente en forma de curva. (DOYLE, 1980, p. 336) A pesar de esto, el metal al cual se le haya aplicado un esfuerzo más allá del límite elástico es capaz de manifestar cierta cantidad de recuperación elástica. Si se hace un doblez hasta cierto ángulo puede esperarse que regrese hasta un ángulo un poco menor cuando se deja libre el material. Este retroceso es mayor a 12 para radios más pequeños, materiales más gruesos, ángulos de doblez más grandes y materiales endurecidos.

Por lo general se devuelven entre 2° y 4°. Al realizar dobleces en los metales es recomendable realizar el trabajo en frío, a temperatura ambiente evitando calentar el material, aunque esto puede incrementar su plasticidad, al aumentar la temperatura se afecta la estructura interna del elemento, cristalizándolo, lo que causa una

disminución de la resistencia mecánica de éste. Al deformar un metal en frío a medida que aumenta el trabajo se requiere más fuerza y la dureza del material se incrementa, sin embargo, se debe tener especial cuidado en no sobrepasar el esfuerzo de ruptura del material porque a partir de este esfuerzo el metal se rompe. Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero Fuente: (HIBBELER, 1997, p. 88) 13 2.4

DOBLADO DE TUBOS

Los materiales de formas y paredes delgadas como la tubería podrían unirse en sus esquinas por medio de uniones comerciales como codos o por soldadura, pero resulta más económico y confiable el proceso de doblado. Los tubos se doblan por métodos que buscan no aplastarlos ni deformarlos en la sección de la curvatura. El radio de doblado se define como el radio de curvatura del eje neutral del tubo. Hace referencia a los grados existentes entre el eje neutral de cada uno de los extremos libres de la curva de tubería. El diámetro interior y exterior del tubo, el espesor de pared nominal y el eje neutral son características del tubo seleccionado como materia prima. El ángulo y radio de doblado dependen de los requerimientos de lo que se está fabricando. La pared interior y exterior en el área de la curva dependen del ángulo y radio generados, además, del proceso y máquina de doblado utilizada. Términos en el doblado de un tubo Fuente: (DOBLATUBOS, 2008)

RADIO DE CURVATURA MÍNIMO

La calidad de las curvas obtenidas al doblar un tubo depende en gran parte de la relación que existe entre el diámetro exterior del tubo a doblar, ($\varnothing_e$), y el radio de curvatura obtenido después de doblar el tubo, (R_c). Esta relación se conoce como factor de curvatura (F_c). $e R_c F_c \varphi =$ Por medio del factor de curvatura es posible determinar el radio mínimo de curvatura que se le puede dar al tubo con el fin de que este no presente achataduras, arrugas ni grietas. Valores de F_c entre 1 y 2, indican que el doblado es de alta dificultad, por lo tanto, es necesario calentar el tubo o utilizar elementos de relleno como mandriles, resina, alquitrán o arena seca para

evitar que se produzcan defectos de calidad. El valor recomendado del factor de curvatura está en un rango de 2.5 a 3.5, en el cual el doblado se considera simple. En la tabla 4 se muestran diferentes diámetros de tubería, con sus respectivos espesores y radios de curvatura para un factor de curvatura Radio mínimo de curvatura para tubos de diferentes diámetros y espesores con $F_c = 3$

$\varnothing$ Nominal Tubo (in)	$\varnothing$ Real Tubo (mm)	Espesor de pared (mm)	Radio mínimo de curvatura (mm)	Radio mínimo de curvatura (in)
0.5	20,63	2,5	61,9	2,4
0.75	25,05	2,5	75,2	3,0
1	32,64	2,5	97,9	3,9
1.25	42,16	2,5	126,5	5,0
1.5	48,26	2,5	144,8	5,7
2	59,24	2,5	177,7	7,0

Fuente: (Elaboración propia)

2.6 TÉCNICAS DE DOBLADO DE TUBOS

Las técnicas usadas comúnmente para doblar tubos son: doblado por estiramiento, doblado a tracción, doblado por compresión, doblado en prensa, doblado por rodillos y extrusión por rodillos.

2.6.1 Doblado por estiramiento.

Se fija el tubo con mordazas contra un bloque o dado formador que gira y tira del metal amoldándolo contra el doblado. La pieza de trabajo que entra en el doblador recibe apoyo mediante una barra de presión. Este método es muy utilizado para trabajo con tubos de pared delgada y para radios de doblados pequeños. Este proceso se muestra en la figura 4. 4 DOYLE, Lawrence. Proceso de manufactura y materiales para ingenieros. México D.F.: Diana, 1980. p. 338. 16 figura 4. Doblado por estiramiento Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

En algunas ocasiones se inserta un mandril, herramienta usada para apoyar el interior del tubo y así mejorar la calidad de la curva, reduciendo al mínimo cualquier aplanado, y para ayudar a controlar el arrugado durante el ciclo de doblado. Los mandriles utilizados comúnmente son esferas, cable, laminadoras o arena. El radio de curvatura máximo utilizando este método es de 180 grados.

2.6.2 Doblado a tracción.

El tubo se tracciona desde ambos extremos mientras se dobla sobre un bloque formador, esta técnica está limitada a dobleces de radio grandes, pero es apropiado para curvas que no son circulares 5. En la figura 5 se muestra un esquema del doblado a tracción. 5 DOYLE, Op. Cit., p. 338 17 Figura 5. Doblado a tracción Fuente: (DOYLE, 1990, p. 339)

2.6.3 Doblado por compresión.

El tubo de trabajo se fija con una mordaza y se le obliga envolverse en torno a un dado formador fijo usando una mordaza deslizante. Esta técnica permite hacer series de dobleces que casi no dejan espacios libres entre ellos 6. Ver figura 6. 6 DOYLE, Op. Cit., p. 338 18 Figura 6. Doblado por compresión Fuente: (DOYLE, 1980, p. 339)

2.6.4 Doblado en prensa o por flexión pura.

Se crea una curva presionando un dado formador sobre el tubo en un movimiento. El tubo es soportado por un par de dados separados, que rotan a medida que el conformador se mueve hacia el centro empujando el tubo. Este movimiento envuelve el tubo alrededor del conformador, permitiendo que los dados de los extremos apoyen el tubo en cada lado. Este proceso es muy rápido y es excelente para altas producciones. Sin embargo, se deben cambiar los dados o la distribución de los mismos para generar diferentes variedades de curvas. El radio de curva máximo es 110 grados.

IV. CONCLUSIONES

El sistema eléctrico, el sistema hidráulico y la tornillería de la máquina dobladora están compuestos totalmente por partes comerciales, permitiendo que en posibles fallas o mantenimientos de la máquina se puedan realizar cambios de repuestos de una manera ágil. Los pasadores y ejes de la máquina fueron diseñados y mecanizados en materiales y dimensiones de fácil adquisición en el mercado, por lo que si se necesitara el reemplazo de alguno de estos componentes se lo puede adquirir fácilmente,

alargando de esta manera la vida útil de la máquina.

El objetivo de fabricar una dobladora de tubos, es obtener un mayor rendimiento en la curvatura permanente por deformación plástica en frío de la tubería redonda de acuerdo a la forma y medidas de una matriz de doblado que asociada a una matriz de sujeción y un mandril de doblado permiten curvaturas limpias y con poca deformación por el arrastre del tubo en el proceso.

Con el diseño realizado para la máquina dobladora de tubería redonda, los resultados de las curvaturas, de la velocidad de trabajo y la calidad de doblado son consistentes con los resultados obtenidos en otras investigaciones como los obtenidos por Ortega 2016.

Dependiendo del espesor de la célula del tubo, es posible calibrar la máquina para obtener mayor velocidad en la curvatura, sin que el tubo sufra deformaciones exteriores importantes o quiebres internos independientemente de que sea un tubo laminado con o sin costura.

Las ecuaciones descritas permiten establecer la elongación del material, la deformación interna y externa de las paredes del tubo, el ovalamiento del tubo, el cálculo de la longitud inicial de la curva de doblado, así como 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. En el proceso de doblado de tubos interviene también el adiestramiento del operario para la inspección visual de las características de la tubería estándar con una célula de 2,5 mm, que entre otras, es posible observar las curvaturas de 30° con una deformación mínima en el inicio de la curvatura, para 60° la deformación interna se acrecenta, pero no se visualiza quiebres u ovalamientos importantes, esto se repite con las curvaturas de 90°, para curvar a 180° el ovalamiento y el estiramiento exterior se visualiza mejor, pero se establece también que por la deformación interna por compresión del doblez obtenido tiene mayor resistencia.

Como se puede apreciar en las tablas 1 y 2 las curvas obtenidas en esta máquina dobladora de tubería tienen una buena calidad, no presentan arrugas, grietas ni ovalamientos significativos; por lo que satisfacen las necesidades para sus principales usos como estructuras de techo, escaleras, pasamanos, carpintería metálica entre otras aplicaciones. La dobladora de tubos está diseñada para curvar tubería estándar de hasta 2,5 mm de célula, motivo por el cual no se debe exceder los 23MPa y una velocidad de curvatura de 25- 30 m/min y para tubería de menos de 1mm de célula no debe exceder de 20-25 m/min. Los datos son de gran importancia porque tiene una base ensayo-error que genera mayor experiencia práctica al operador. El diseño de la máquina permite que sea posible adaptar nuevas matrices para diferentes diámetros menores a 2 pulgadas de diámetro, además es posible experimentar con materiales más dúctiles como lo son aluminio, cobre o con aceros inoxidables.

REFERENCIAS

- X. Zhang, H. Zhang, and K. Leng, "Experimental and numerical investigation on bending collapse of embedded multi-cell tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 127, no. March, pp. 728–740, 2018.
- Ghiotti, E. Simonetto, S. Bruschi, and P. F. Bariani, "Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1, pp. 289–292, 2017.
- A. Arias and A. M. Mena, "Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda," p. 116, 2009.
- N. C. Tang, "Plastic-deformation analysis in tube bending," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 77, no. 12, pp. 751–759, 2000.
- 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, De- terminación 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
- 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.