

# Simulación del proceso de forja en caliente de codos sin costura

Ezequiel Salas Zamarripa, Martha Patricia Guerrero Mata,  
Rafael Colás

Doctorado en Ingeniería de Materiales

FIME-UANL

José Martínez

Tamsa, S.A. de C.V.

## ABSTRACT

*In this work, a finite element numerical model of the hot forging process of seamless elbows was validated. The validation was carried out by comparing the equivalent strain distribution predicted by the model with the computed strain values from a viscoplasticity analysis. A visual and dimensional correlation of the numerical and actual elbow was made as well. Mechanical properties of the material were obtained from axial compression tests carried out at the working temperature of the process.*



## KEYWORDS

Simulation, viscoplasticity, metal forming, seamless fittings.

## RESUMEN

*Este trabajo presenta la validación de un modelo numérico por elementos finitos del proceso de forja en caliente de codos sin costura. La validación se llevó a cabo por medio de la comparación de la distribución de deformación equivalente obtenida en el modelo numérico con la distribución calculada por medio de un análisis viscoplastico. También se llevó a cabo una correlación dimensional y visual del codo del modelo numérico con un codo formado en planta. Las propiedades mecánicas del material fueron obtenidas mediante ensayos de compresión en caliente.*

## PALABRAS CLAVE

Simulación, viscoplasticidad, formado de metales, conexiones sin costura.

## INTRODUCCIÓN

Las conexiones soldables sin costura son comúnmente usadas en redes de tuberías a alta presión. Para asegurar la calidad del producto es necesario obtener propiedades mecánicas y físicas dentro de tolerancias muy estrechas.

La fabricación de codos comienza con el corte de tubería recta sin costura en dimensiones específicas según el producto final. La operación de forja en caliente

se efectúa en una prensa hidráulica horizontal que hace pasar los segmentos de tubería recta a través de un eje, en cuyo extremo se encuentra la herramienta de formado o mandril. La etapa de deformación tiene lugar dentro de un horno, donde las preformas alcanzan una temperatura de alrededor de 800 °C.<sup>1,2</sup> En la figura 1 se muestra un diagrama de la operación de formado.

La práctica ha mostrado que las propiedades mecánicas y características geométricas del producto final dependen en parte de la forma del mandril. Otras variables presentes en el proceso son la temperatura, la velocidad de alimentación, la posición de los quemadores en el horno. Este proyecto tiene como objetivo evaluar el efecto de la geometría del mandril sobre las características finales del codo, por medio de la prueba de distintos diseños de mandril haciendo uso de la simulación por el método de elementos finitos. Sin embargo, el primer paso es la obtención de un modelo numérico que reproduzca el proceso real para su validez. Este trabajo muestra los resultados obtenidos en la validación del modelo.

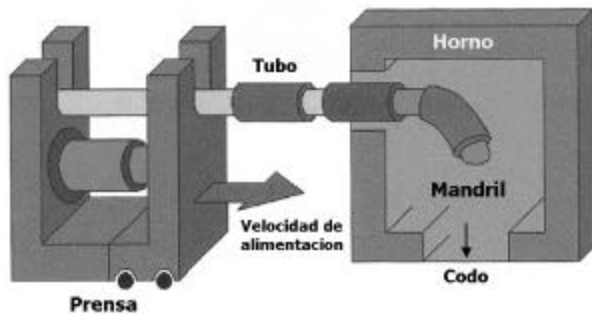


Fig. 1. Diagrama del proceso de forja en caliente de codos sin costura.

### EXPERIMENTACIÓN

La distribución de deformación en los codos producidos en planta fue obtenida por medio del método de viscoplasticidad.<sup>3,4</sup> Preformas utilizadas en planta (tubería recta sin costura de acero ASTM A106) de 60 mm de diámetro externo, 6 mm de espesor y 317 mm de longitud, fueron maquinadas en su superficie externa para producir una rejilla. La circunferencia fue dividida en 12 segmentos iguales y en 20 segmentos en su longitud, como se muestra en la figura 2.



Fig. 2. Identificación de celdas en la preforma.

Cada celda fue medida antes y después de la deformación, en dirección circunferencial (y) y longitudinal (x), como se muestra en la figura 3.

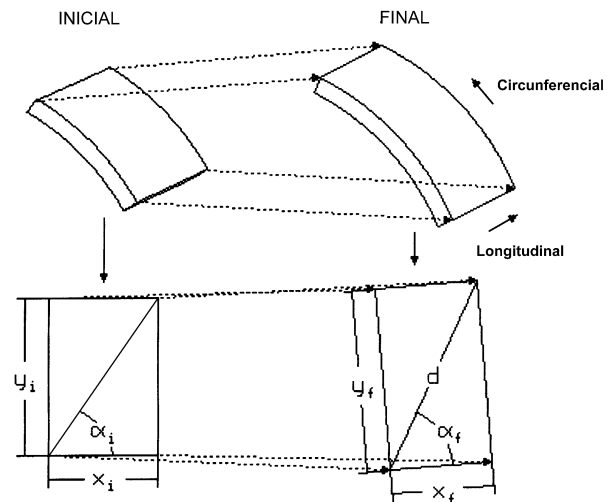


Fig. 3. Esquema de las mediciones en las celdas.

Mediante estas mediciones se pueden calcular los componentes de deformación en la dirección circunferencial ( $\theta$ ) y longitudinal ( $z$ ) con las siguientes ecuaciones:<sup>3</sup>

$$\dot{a}_\theta = \ln(y_i/y_f)$$

$$\dot{a}_z = \ln(x_i/x_f)$$

El componente de deformación radial ( $r$ ) se calcula considerando volumen constante:

$$\dot{a}_r = -(\dot{a}_\theta + \dot{a}_z)$$

El componente cortante se relaciona al cambio en el ángulo por la distorsión de las celdas:

$$\ddot{a}_{\theta z} = 2\dot{a}\dot{a} = 2(\dot{a}_f - \dot{a}_i)$$

La deformación equivalente está dada por:

$$\dot{\bar{a}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\dot{a}_z - \dot{a}_\theta)^2 + (\dot{a}_\theta - \dot{a}_r)^2 + (\dot{a}_r - \dot{a}_z)^2 + \frac{3}{2} \ddot{a}_{\theta z}^2 \right]^{1/2}$$

Las propiedades mecánicas fueron obtenidas por medio de ensayos de compresión en caliente. Muestras cilíndricas de 10 mm de diámetro y 15 mm de longitud fueron usadas para llevar a cabo los ensayos a 800°C. Las probetas fueron calentadas mediante un horno de inducción. Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas fueron utilizadas para determinar la curva de flujo del material, del tipo propuesto por Hollomon,<sup>5</sup>  $\sigma = K\dot{\epsilon}^n$ . Se determinó un valor de 280 MPa para el coeficiente de resistencia, K, y 0.256 para el valor del exponente de endurecimiento por deformación, n. La figura 4 muestra cuatro curvas experimentales sobre las que se traza la ecuación constitutiva a emplear en el modelo numérico.

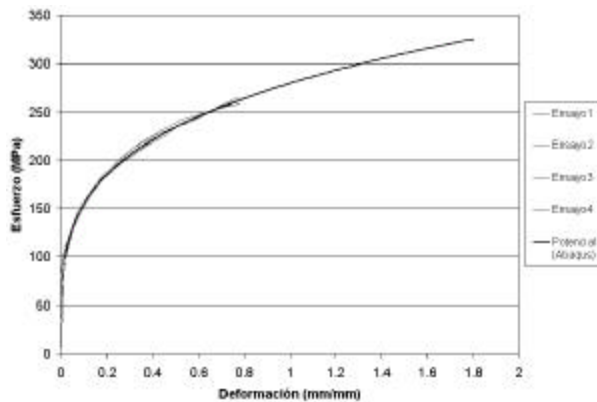


Fig. 4. Curvas esfuerzo-deformación.

### MODELO NUMÉRICO

Para el desarrollo del modelo numérico del proceso se utilizó el paquete computacional de elementos finitos Abaqus<sup>MR</sup>. Para efecto de ahorro de tiempo de cómputo sólo fue modelada una mitad de la geometría del proceso, ya que presenta simetría.

El modelo consiste del mandril y tres preformas colocadas consecutivamente en la entrada del mandril, como se muestra en la figura 5.

La validación se efectuó en el tubo situado en medio, ya que es el que describe el proceso continuo en planta. La geometría del mandril fue considerada como una superficie rígida, ya que no sufre una deformación considerable en relación a la que experimenta el tubo. Los efectos de los cambios de temperatura durante la deformación fueron despreciados, sólo fue alimentado al programa el comportamiento del material a la temperatura de

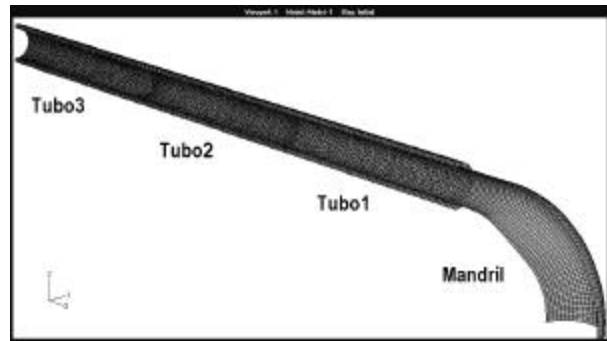


Fig. 5. Modelo numérico discretizado.

trabajo, obtenido de los ensayos de compresión en caliente, lo que equivale a que el proceso se lleva a cabo a temperatura constante de 800°C. Condiciones de frontera de desplazamiento fueron aplicadas en las caras posteriores de los tubos, para definir el avance del proceso de 10 mm/seg. Las condiciones de simetría fueron definidas en las superficies apropiadas y el mandril fue mantenido en posición fija durante la simulación. Se definieron condiciones de contacto entre la superficie interior de cada tubo y el mandril, así como los contactos entre los mismos tubos. En el modelo se utilizaron alrededor de 10,000 elementos tetraédricos lineales para cada tubo y 1,200 elementos cuadriláteros lineales para el mandril. Estos números ofrecieron la mejor compatibilidad entre tiempo de cómputo y correlación con las mediciones visioplásticas.

### RESULTADOS

Mediante el método de visioplasticidad se obtuvo una aproximación de la distribución de deformación en el codo del proceso real. La figura 6 muestra los valores de deformación para cada columna de celdas (letras A-L).

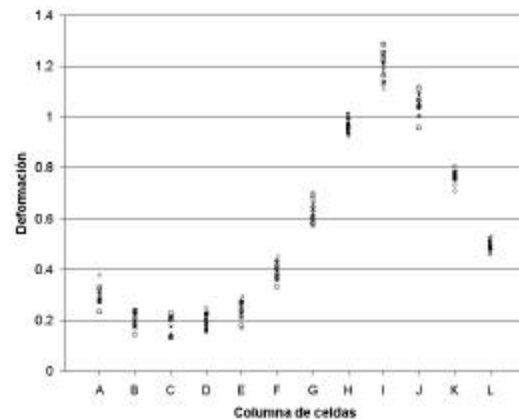


Fig. 6. Distribución de deformación equivalente por el método de visioplasticidad.

Para llevar a cabo la comparación entre el modelo numérico y el visioplástico fue necesario definir un punto de comparación entre ambos modelos. Para lograr esto se dividió al codo en tres zonas, como se muestra en la figura 7.

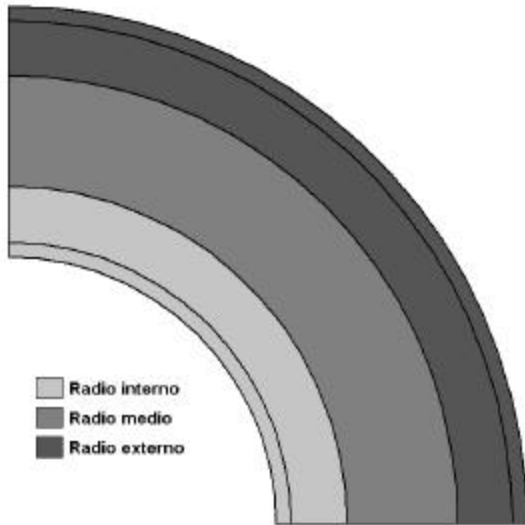


Fig. 7. Zonas de comparación de deformación entre el modelo numérico y el visioplástico.

Entonces, se llevó a cabo una agrupación de las columnas de celdas en el modelo visioplástico, asignando las columnas correspondientes a cada zona. Las columnas fueron agrupadas como se muestra en la tabla I.

Tabla I. Columnas correspondientes a cada zona.

Zona	Columnas de celdas
Radio interno	H, I, J
Radio medio	F, G, K, L
Radio externo	A, B, C, D, E

Como se puede observar, la zona del radio interno abarca sólo tres columnas. Esto es debido a que en esta zona ocurre la mayor deformación y las celdas se deforman aproximadamente al doble de su longitud original en la dirección circunferencial.

Los valores de deformación en el modelo numérico fueron extraídos desde el paquete computacional para cada zona de comparación. La figura 8 muestra la deformación predicha por el modelo numérico, donde se puede observar que la distribución de deformación es relativamente constante en cada sección transversal del codo, lo que valida la división en zonas mostrada en la figura 7.

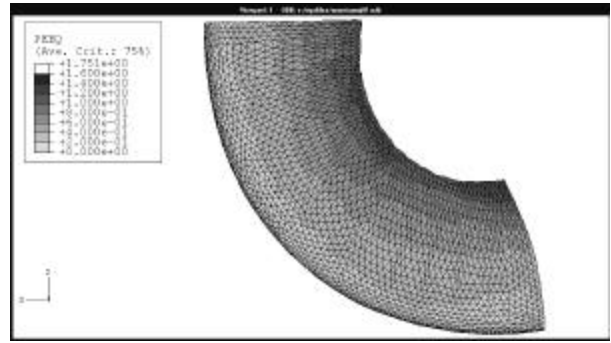


Fig. 8. Distribución de deformación equivalente en el modelo numérico.

Las diferencias entre el modelo numérico y el modelo visioplástico se pueden atribuir a la discretización de ambos casos. El modelo visioplástico proporciona un valor de deformación para cada una de las 240 celdas, mientras que el modelo por elementos finitos proporciona un valor para cada uno de los aproximadamente 10,000 elementos. Por ejemplo, el modelo visioplástico no reporta valores de deformación entre 0.8 y 0.9, sin embargo, este rango de deformación si es cubierto por el modelo numérico.

La figura 9 muestra la deformación máxima, mínima y promedio para cada una de las zonas del modelo visioplástico contra el numérico. Los resultados muestran buena correlación, por lo que se puede concluir que la distribución de deformación obtenida en el modelo numérico concuerda con la obtenida en el proceso real.

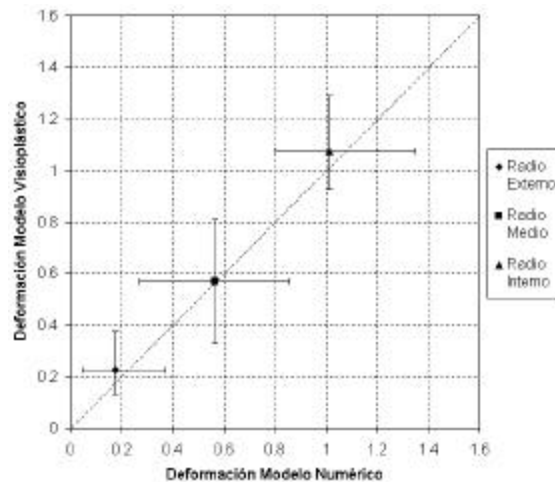


Fig. 9. Distribución de deformación en el modelo numérico y el visioplástico.

Además de la distribución de deformación, también se verificaron distintas características geométricas del codo formado. En la Figura 10 se muestran las mediciones tomadas en ambos modelos para su comparación.

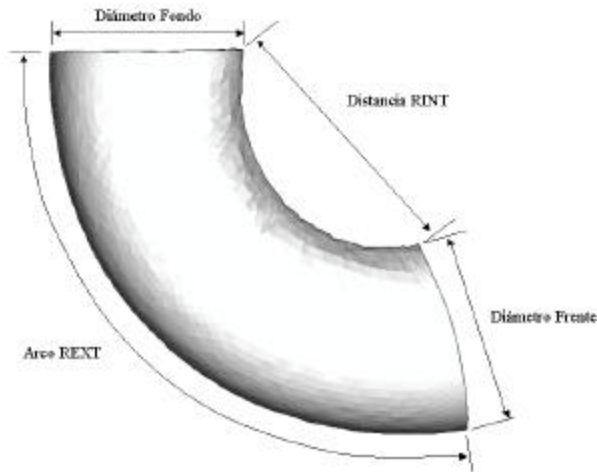


Fig. 10. Mediciones para comparación dimensional.

También fueron medidos los espesores de pared en las secciones de la mitad del tubo, que corresponden a las zonas del radio interno y externo. La tabla II muestra los resultados de las mediciones.

Tabla II. Comparación de las dimensiones del codo.

Zona	Númérico (mm)	Real (mm)	Error (%)
Diám. Frente	89.38	93.2	4.09
Diám. Fondo	89.67	90.7	1.13
Dist. RINT	122.07	118.0	3.33
Arco REXT	302.27	301.0	0.42
Espesor RINT	5.29	5.1137	3.332
Espesor REXT	5.58	5.5083	1.285

Desde un enfoque visual, se puede observar una gran similitud en la forma del codo en el modelo numérico con el real. Una característica que muestran los codos formados en planta es la holgura que se presenta en el frente de la zona del radio externo, misma que se reproduce en el modelo numérico. Así mismo, al frente en el radio interno se presentan distorsiones en el perfil de la boca del codo, las cuales también se reproducen. La figura 11 muestra estas características en ambos modelos.

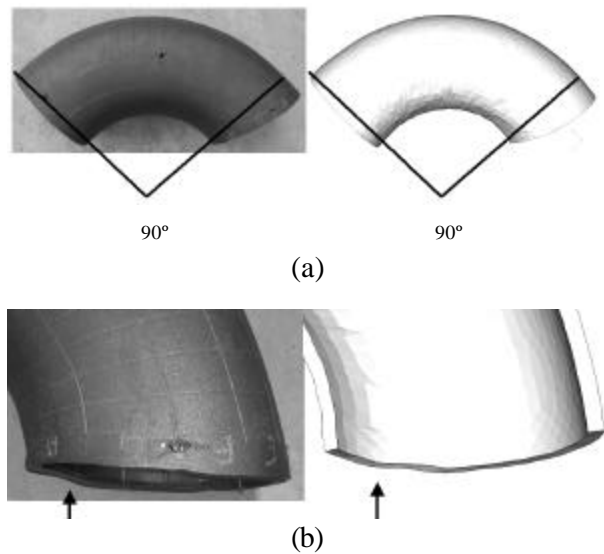


Fig. 11. (a) Holgura del radio externo y (b) distorsión en el perfil frontal de la boca del codo.

La holgura en la parte frontal del radio externo representa material de pérdida y aumento en los costos de producción, ya que esta parte tiene que ser maquinada para remover el exceso de material y así obtener el codo de 90°. Además, uno de los parámetros críticos es el espesor de pared, ya que una reducción excesiva provoca el rechazo de las piezas.

Por medio de la evaluación de diferentes geometrías del mandril se espera obtener un diseño que mejore las características de los codos formados.

## CONCLUSIONES

La distribución de deformación equivalente, las características dimensionales e incluso visuales, muestran que el presente modelo numérico por elemento finito es representativo del proceso real.

El modelo numérico desarrollado puede ser usado para evaluar distintos diseños de la herramienta de formado y así seleccionar el diseño con el que se obtenga un producto de mejores características que el actual.

El análisis visioplástico representa una metodología confiable para el cálculo de la deformación en piezas del proceso en planta, aunque está limitado por el grado de discretización y la exactitud de las mediciones.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica de la UANL, por su apoyo económico. Se agradece también a la empresa Tubos de Acero de México S.A. (anteriormente Empresas Riga, S.A. de C.V.), por los servicios brindados.

## REFERENCIAS

1. J.A. López Cavazos, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001
2. A. Rodríguez, M. Mezzetti, P. Fodor, R. Colás, Forming of Seamless Pipe Fittings, *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Elsevier Science, 2002, p. 432-437.
3. A. Rodríguez, G. Olvera, P. Fodor, R. Colás, Strain Distribution Analysis of Hot Forged Seamless Pipe Fittings, *Materials Science and Technology*, Febrero 2000, Vol. 16, p. 171-174.
4. R. Colás, Visioplastic Analysis of Metal Working Processes, *Thermomechanical Processing of Steel*, J.J. Jonas Symposium, S. Yue y E. Essadiqi (eds.), CIM, Montreal, 2000, pp.569-579.
5. M. G. Rodríguez, E. Valdés, P. C. Zambrano, M. P. Guerrero, R. Colás, Visioplastic Analysis of Experimental Rolling of Steel, *Procedures of the IMechE Part L Journal of Materials: Design and Applications*, Professional Engineering Publishing, 2001, Vol. 215, pp. 155-163.
6. J. H. Hollomon: *Trans. AIME*, 1945, vol. 162, p. 268.



## XV CONGRESO Y EXPOSICIÓN INTERNACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN

2 a 4 de octubre de 2003  
CINTERMEX, Monterrey, N.L., México



AMERICAN FOUNDRY SOCIETY

mayores informes:  
Sociedad Mexicana de Fundidores, Región Norte.  
Tel: (81) 8352-5519  
Fax: (81) 8352.5579