

**Selección de aceros para el
rediseño mediante mecánica
computacional de un
herramiental para doblar
tubos**

Dr. Javier Flores Méndez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Tecnológico Nacional de México/I.T. Puebla

Dr. Gustavo M. Minquiz Xolo

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Tecnológico Nacional de México/I.T. Puebla

Dr. M. Claudia Denicia Carral

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Ana Luisa Ballinas Hernández

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Héctor Medina Cruz

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Manuel Aparicio Razo

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Abstract

In this work a methodology by using the computational finite element method of a tooling designed for the process tube bending in the automotive industry, in order to determine the magnitude and location of the geometric stress concentration is implemented. The tooling is modeled computationally with a steel degree AISI-D2 (current design) and subsequently with steel AISI-4140. Because the null information about the mechanical properties of these materials, the methodology for their determination is presented. The modeling and simulation with the steel AISI-D2 indicates a geometric location coincident of the stress concentration with the fracture zone when the tooling fails by operating, therefore, the magnitudes of the numerical results are considered reliable. Finally, modeling with the steel AISI-4140 proposes it as a viable alternative because not compromise the functioning of the system and also has a low cost and easy to manufacture.

Keywords: Finite Element Method, Mechanical Properties, Steel, Stress, Strain.

Resumen

En este trabajo se implementa una metodología por el método del elemento finito computacional a un herramental diseñado para el proceso de doblado de tubos en la industria automotriz, con la finalidad de determinar la magnitud y ubicación geométrica de la concentración de esfuerzos. El herramental se modela computacionalmente con un acero grado herramienta AISI-D2 (diseño actual) y posteriormente con uno AISI-4140. Es importante mencionar que, debido a la escasa información respecto a las propiedades mecánicas de estos materiales, se presenta también la

metodología para su determinación. El modelado y simulación con el acero AISI-D2 indica una ubicación geométrica de la concentración de esfuerzos coincidente con la zona de fractura cuando el herramental falla por su operación, por lo tanto, las magnitudes de los resultados numéricos se consideran confiables. Finalmente, el modelado con el acero AISI-4140 lo propone como una alternativa viable ya que no compromete el funcionamiento del sistema y además tiene un bajo costo y es de fácil manufactura.

Palabras clave: Método de Elemento Finito, Propiedades mecánicas, Acero, Esfuerzo, Deformación.

Introducción

En la actualidad las empresas del ramo automotriz cuentan con un área de doblado de tubos, dicha operación es realizada con equipos automatizados CNC, los cuales utilizan un herramental para el doblo de tubos y están manufacturados con acero tipo herramental AISI-D2 con un tratamiento térmico de nitruración al alto vacío, dando como resultado un incremento de la dureza superficial. El herramental o árbol de doblado de tubos que se analizará está sometido a diversas fuerzas en el proceso de operación, una de ellas es causada por la resistencia del tubo que se desea doblar y el acoplamiento que tiene el herramental en sus diversos niveles de doblado, lo anterior da como resultado un momento flector que actúa en la base del herramental (fig. 1); ahí mismo también interactúa una fuerza de rotación originada por la propia maquina dobladora durante el proceso de doblez del tubo, estas cargas son cíclicas y dan lugar a una falla por fatiga (fig. 2).



Figura 1: Herramental para el doblado de tubos en operación.



Figura 2: Herramental fracturado en la base.

Una alternativa para aumentar el ciclo de vida de operación del herramental consiste en aplicar el método de análisis por elemento finito asistido por computadora para modelar y simular un rediseño de la geometría de la herramienta y sus componentes y optimizar la concentración de esfuerzos, otra opción es realizar el estudio de mecánica computacional con un material que mejore las propiedades mecánicas y

tratamiento térmico del acero AISI-D2 y sea el adecuado para el proceso de doblado y evitar una herramienta muy tenaz que en presencia de una flexión excesiva tienda a fracturarse. Esta última metodología se aplicará en el presente trabajo de investigación con el objetivo de analizar la viabilidad de fabricar el árbol de doblado con un acero más rentable en cuanto a costo y manufactura. Por ejemplo, en

la Ref. (Mayén, 2010) se analizan las propiedades mecánicas de aceros grado herramienta AISI-D2 y AISI-O1, con la finalidad de diseñar y fabricar mordazas y pernos de sujeción para especímenes compactos de tensión. Para ello fue necesario llevar a cabo un estudio de las propiedades mecánicas de los materiales mediante pruebas en laboratorio, donde se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación; con los datos obtenidos se llevó a cabo un diseño de la mordaza en el programa especializado en el estudio de elemento finito ANSYS-11.

Validando los resultados obtenidos al coincidir la zona de concentración de esfuerzo máximo señalada por el programa con la zona donde se presentó la fractura de los especímenes sometidos a pruebas de laboratorio y en la práctica. Posteriormente se llevó a cabo la selección de la óptima configuración entre material y geometría para el ciclo de vida de operación de la mordaza (optando por el material AISI-O1). Otros estudios más recientes, mejoran las propiedades mecánicas de los aceros con alto contenido de carbono grado AISI para herramientas aplicando tratamientos criogénicos profundos. Las muestras preparadas conforme las normas ASTM se introducen en refrigeradores criogénicos a diferentes ciclos de tiempo (por ejemplo 6, 12, 24 y 36 horas) en rangos de temperatura entre -154°C y -196°C , posteriormente se someten a un tratamiento de templado a altas temperaturas entre 150°C y 600°C . Al evaluar las propiedades mecánicas de las muestras como microdureza, propiedades de tracción y microestructura, se ha demostrado una mayor dureza y reducción en la resistencia a la tracción, por otra parte, mediante técnicas de rayos X se muestra que el contenido

de austenita retenida de las muestras tratadas con diversos tratamientos criogénicos se reduce a casi cero (Katoch, 2019; Kumar, 2022; ^aXu, 2022; ^bXu, 2022; Xu, 2023).

En la última década, la investigación de las propiedades mecánicas de los aceros grado herramienta se ha concentrado en el interés de su fabricación por el uso de procesos de manufactura aditiva. Uno de los procesos industrializados de fabricación de metales más común es la fusión del lecho de polvo por láser (LPBF). Esta técnica se basa en modelos de diseños asistidos por computadora (CAD), un rayo láser funde la estructura deseada por la deposición de capas sucesivas de material en polvo. En esta operación, una parte esencial son los parámetros del proceso LPBF, tales como, la potencia del láser, el diámetro del punto láser y la velocidad de escaneo que tienen un fuerte impacto en las propiedades mecánicas del material resultante. Para el caso de los aceros austeníticos AISI manufacturados a diferentes temperaturas de precalentamiento de la placa base durante el proceso (lo que permite reducir el gradiente térmico y las tensiones residuales), se ha reportado que las propiedades mecánicas bajo cargas estáticas de las muestras fabricadas con LPBF son iguales o mejores que las de las muestras fabricadas convencionalmente. Lo anterior se atribuye a su fina microestructura (Kunz, 2020; Qin, 2021; ^aQin, 2023). Para evitar la desventaja de los defectos internos como poros y malas cualidades superficiales que inciden en una baja resistencia a la fatiga, se han indicado procesos posteriores de prensado isostático en caliente (Åsberg, 2019; ^bQin, 2023). Lo anterior incluso ha permitido aplicar a los diseños obtenidos tratamientos térmicos convencionales

para obtener una alta microdureza y resistencia a la compresión (Sander, 2016; Mazeeva, 2023; Van Trinh, 2023). La presente investigación se divide como sigue: en la sección 2 se presenta el diseño y geometrías del herramental, posteriormente en la sección 3 se indican las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y AISI-4140 y se muestran los resultados del modelado y simulación mediante mecánica computacional para cada uno de los materiales propuestos para el herramental. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

1. DISEÑO DEL HERRAMENTAL

En este capítulo se describe la geometría del herramental (en mm) para el proceso de doblado de tubos. A través de mediciones directas en un herramental

patrón y utilizando instrumentos de medición convencionales se obtiene un diseño en CAD (utilizando el programa de diseño CATIA V5).

1.1 Árbol de doblado (Bend Die Body)

El árbol de doblado es la herramienta principal que establece el radio de la curva del tubo. La herramienta es de acero o acero aleado y es tratada a temperaturas altas con nitruro. Las figs. 3 y 4 muestran el diseño del árbol de doblado que se analizará para doblar tubos de acero AISI-409 con un radio de curvatura de doblado de 16mm y ángulo de 125°, longitud de 365.5mm y radio exterior (r_2) e interior (r_1) de 10.0mm y 9.5mm, respectivamente (OMNI-X MX, 2020).

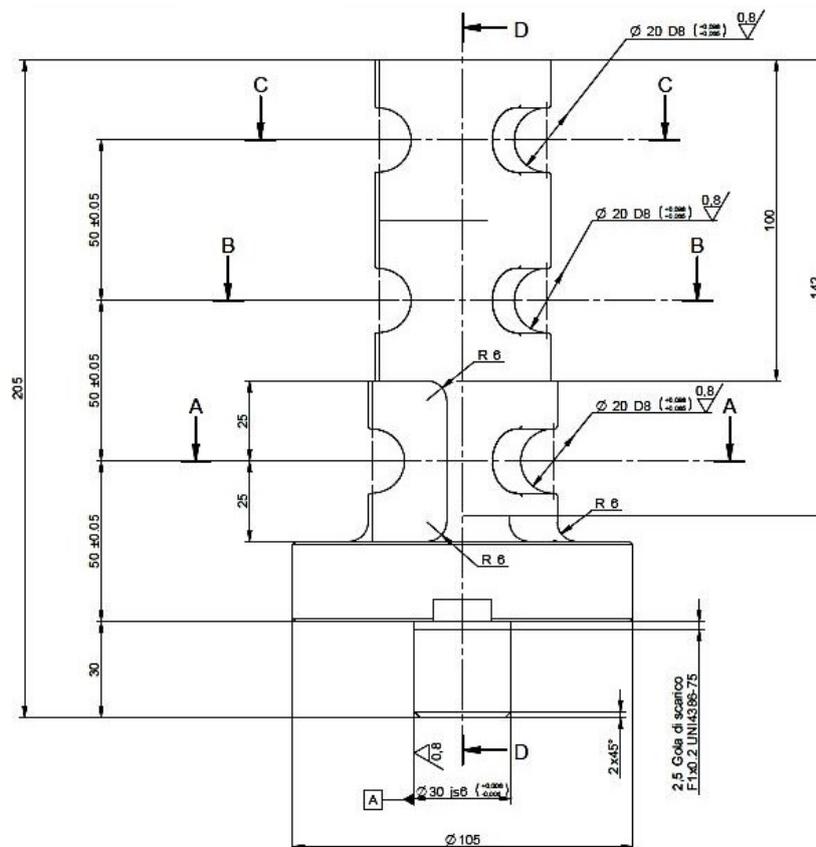


Figura 3: Geometría de la vista frontal del árbol de doblado.

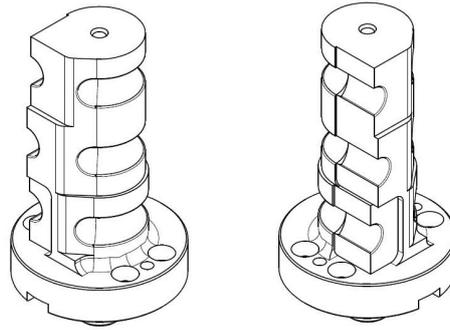


Figura 4: Vista en Isométrico del árbol de doblado.

1.2 Dado de Ajuste (Clamp)

El dado de ajuste (fig. 5) tiene el mismo acabado que el árbol de doblado. Y su

función principal es sujetar el tubo en conjunto con el árbol de doblado durante la flexión.

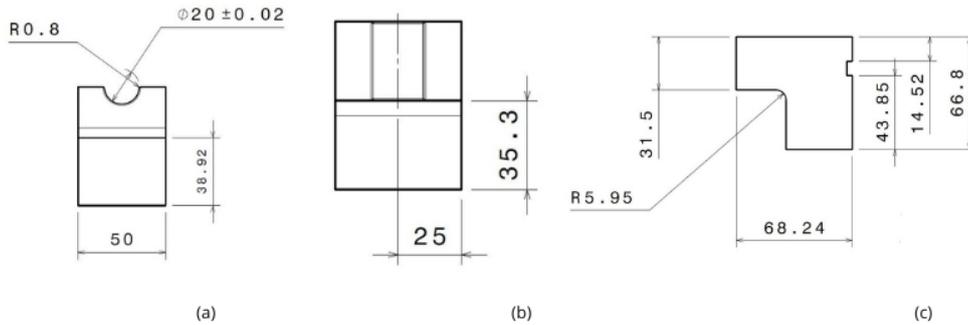


Figura 5: Geometría del dado de ajuste, (a) vista frontal, (b) vista superior y (c) vista lateral.

1.3 Dado de presión (Pressure Die)

El dado de presión es usado para mantener presión constante en el tubo cuando la flexión ocurre y por lo tanto

proporciona una fuerza de reacción para crear la curva. En la fig. 6, se ilustra el dado de presión

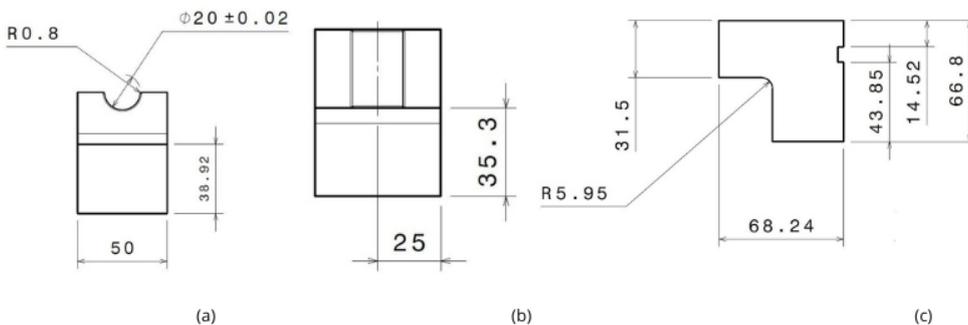


Figura 6: Geometría del dado de presión, (a) vista frontal, (b) vista superior y (c) vista lateral.

1.4 Dado deslizante (Wiper Die)

El dado deslizante se monta en la ranura del árbol de doblado con la punta colocada de forma tangente. La función

principal es eliminar la fricción para evitar arrugas en el interior del radio de curvatura. En la fig. 7, se ilustra el dado deslizante en estudio.

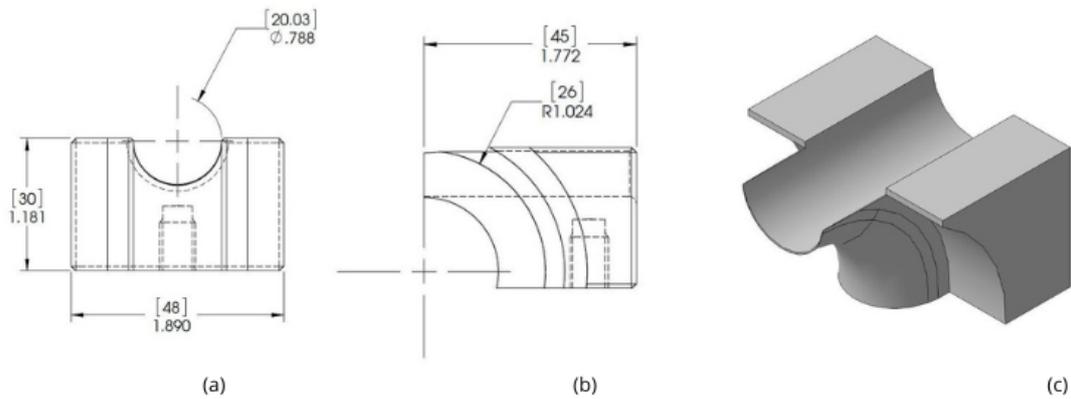


Figura 7: Geometría del dado deslizante, (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista en isométrico.

1.5. Ensamble del herramental

El ensamble del árbol de doblado con respecto al dado de ajuste, dado presión, dado deslizante y el tubo (Pipe) se realiza en la misma forma en que se lleva a cabo en la práctica el proceso de doblado del

tubo (fig. 8). Se considera el tercer nivel de doblado, ya que al ser el más distante respecto a la base y al aplicar la carga necesaria para doblar el tubo, se produce el mayor esfuerzo sobre el herramental.

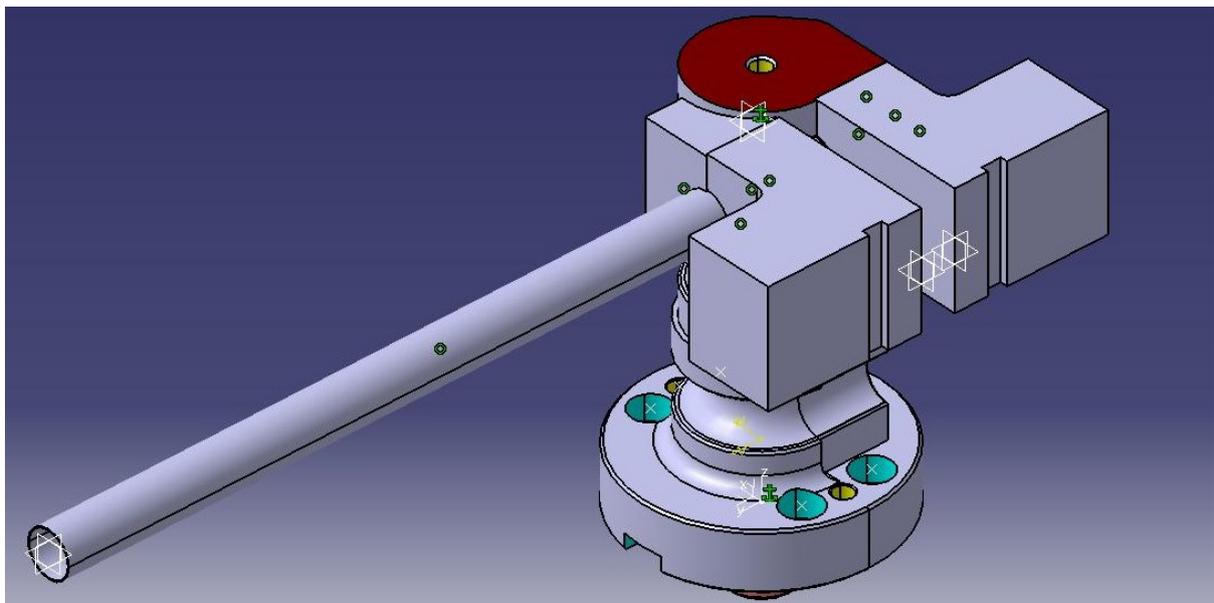


Figura 8: Ensamble: Bend Die Body-Wiper Die-Pipe-Clamp-Pressure Die.

2. MATERIALES, MODELADO Y SIMULACIÓN

2.1 Determinación de las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y AISI-4140.

El árbol de doblado y sus componentes se fabrican con un acero grado de herramienta AISI-D2, el cual es nitrurado al alto vacío para proporcionar una dureza de 65 HR-C en su superficie (Martínez-Reyes, 2020). Dentro de la categoría de los aceros dúctiles, el AISI-4140 tiene una amplia gama de aplicaciones industriales que abarca la manufactura de cigüeñales, flechas de transmisión, pernos, engranes, ejes, bielas, etc. Además de ser más económico y de fácil maquinado (Martínez-Reyes, 2020; Morral, 2021].

Para llevar a cabo el estudio por elemento finito computacional, es necesario determinar las propiedades mecánicas de los aceros a utilizar, dichas propiedades determinan el comportamiento del material durante la aplicación de cargas. Mediante un ensayo de tensión se determinan las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y 4140, para ello se utilizó una máquina universal de pruebas

a tracción servo-hidráulica, Marca: SHIMADZU, Serie: AGS-X de 100kN de capacidad que determina el módulo de elasticidad (E), esfuerzo de fluencia (S_Y), esfuerzo último (S_U) y coeficiente de Poisson (ver fig. 9 y tablas 1, 2). Para las pruebas se utilizaron probetas de 100.00mm de longitud las cuales fueron maquinadas bajo la norma ASTM E8-08 (fig. 10), manejando velocidades de cabezal de 10 mm/min a temperatura ambiente y con un factor de repetibilidad de 5.0 pruebas, para cada uno de los aceros. Cabe señalar que el tratamiento de nitruración proporciona una dureza superficial y conserva las propiedades mecánicas del material en el núcleo, este tratamiento se realiza para evitar el desgaste o rallado por fricción (Schmid, 2015). Por tal motivo en la medición de dureza se utilizan materiales sin tratamiento (ver tablas 1, 2). Para las pruebas de dureza se utilizó un equipo automático Marca: AFFRI, Serie: 32E-RSD y un penetrador de diamante para escalas HR-C (Rockwell-C) empleando una precarga de 10.00kg y una carga de 100.00kg. Por otra parte, en la tabla 3 se enlistan las propiedades mecánicas del acero AISI-409 (material de manufactura del tubo).

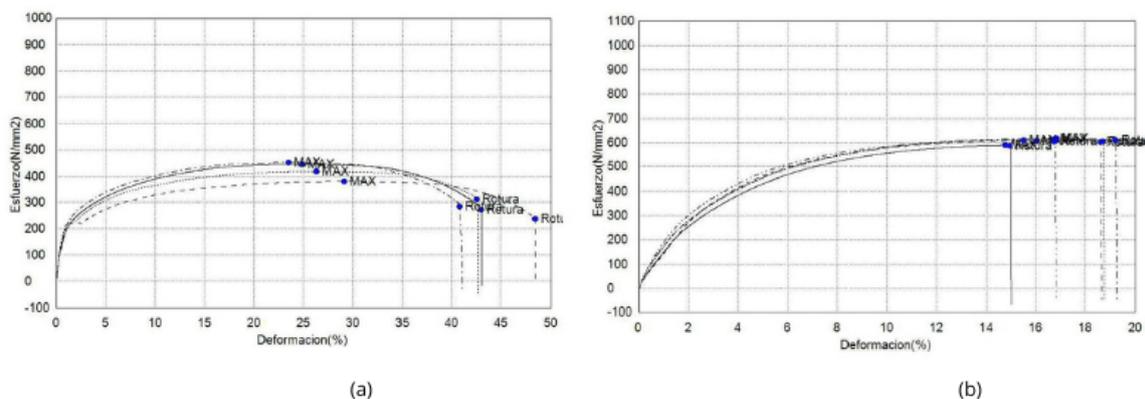


Figura 9: Gráfico esfuerzo vs deformación del acero AISI-4140 (a) y AISI-D2 (b).

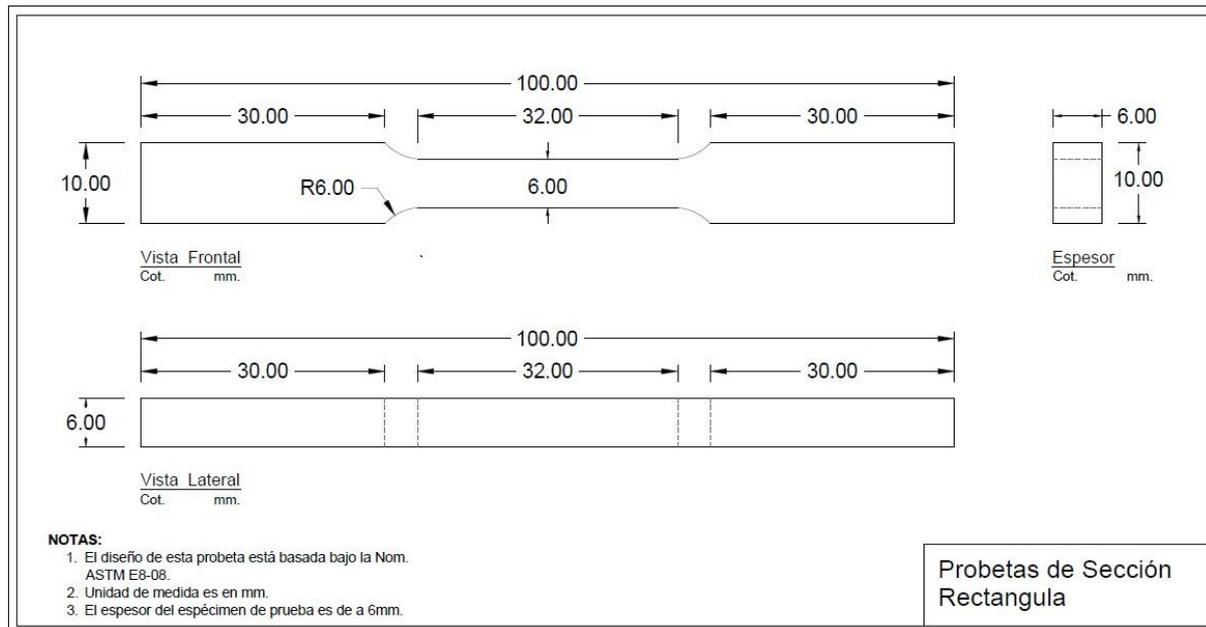


Figura 10: Probeta de sección rectangular ASTM E8-08.

Tabla 1: Resumen de las propiedades mecánicas del acero AISI-4140.

Probeta	E (GPa)	S_Y (MPa)	S_U (MPa)	Coefficiente de Poisson	Dureza HR-C
1	208	210.89	380.12	0.3	31.3
2	206	211.47	418.25	0.3	33.7
3	214	212.53	444.63	0.3	36.8
4	216	214.96	450.52	0.3	37.6
5	206	211.33	417.43	0.3	32.4
Valor promedio	210	212.23	422.19	0.3	34.36

Tabla 2: Resumen de las propiedades mecánicas del acero AISI-D2.

Probeta	E (GPa)	S_Y (MPa)	S_U (MPa)	Coefficiente de Poisson	Dureza HR-C
1	198.4	251.82	587.39	0.3	52.3
2	198.3	283.30	615.42	0.3	57.6
3	197.7	275.65	610.09	0.3	55.2
4	197.7	267.18	606.64	0.3	54.7
5	198.8	282.57	613.51	0.3	56.2
Valor promedio	198.2	272.10	606.61	0.3	55.2

Tabla 3: Propiedades mecánicas del acero AISI 409.

Densidad (kg/cm ³)	E (GPa)	S _Y (MPa)	Coefficiente de Poisson	Dureza HR-B
7.739	220	240	0.3	75.0

Es importante destacar que a partir de las curvas *Esfuerzo-Deformación*, se observa que el acero AISI-D2 se comporta como un material frágil (mayor tenacidad), mientras que el acero AISI-4140 como un material dúctil.

2.2 Aplicación de cargas y condiciones de frontera en el modelado y simulación

Para poder determinar las cargas que actúan sobre el herramental se analiza el funcionamiento del árbol de doblado al interactuar con el dado de ajuste, dado de presión, dado deslizante y el mismo tubo, al momento de comenzar

el proceso de doblado. Se deducen las fuerzas aplicadas por el dado de ajuste y el dado de presión, los cuales actúan directamente sobre el árbol de doblado y el dado deslizante cuando sujetan y doblan el tubo, dichas fuerzas están relacionadas con el momento plástico del tubo (Schmid, 2015) y las reacciones que este provoca al resistirse a la deformación plástica total.

En la tabla 4, se muestran los resultados durante el proceso de doblado del tubo en función de sus características geométricas (fig. 11) y las propiedades mecánicas del material considerando que es un material elastoplástico perfecto (Budynas, 2019).

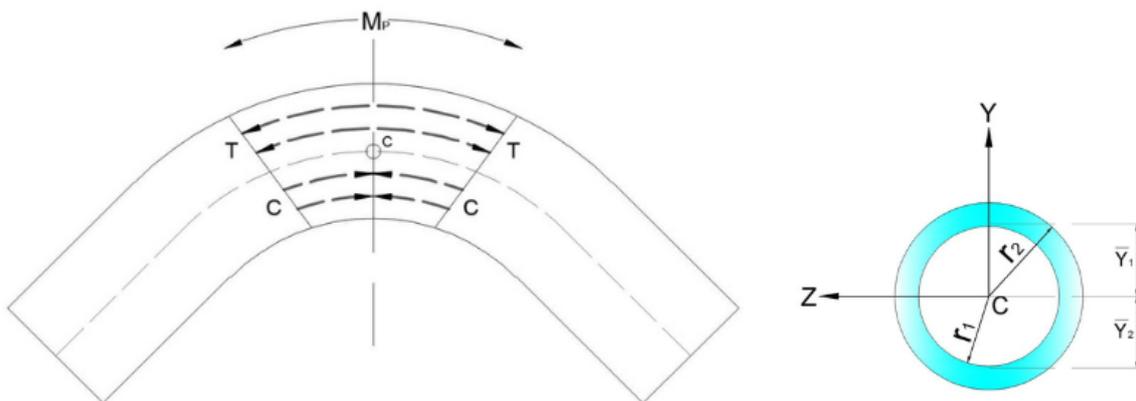


Figura 11: Comportamiento mecánico durante el proceso de doblado del tubo.

Tabla 4: Resultados del análisis del proceso de doblado de tubo

Parámetro	Ecuación	Resultados
Momento de Fluencia	$M_Y = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{4r_2} \cdot S_y$	$M_Y = 34964.748 \text{ Nmm}$
Distancia del eje neutro al centroide de una sección semicircular	$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{4(r_2^3 - r_1^3)}{3\pi(r_2^2 - r_1^2)}$	$\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = 6.208 \text{ mm}$
Momento Plástico	$M_P = \frac{4}{3}(r_2^3 - r_1^3) \cdot S_y$	$M_P = 45640.00 \text{ Nmm}$
Fuerza de tensión y compresión	$T = C = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{2} \cdot S_y$	$T = C = 3675.663 \text{ N}$
Factor de forma	$f = \frac{16r_2(r_2^3 - r_1^3)}{3\pi(r_2^4 - r_1^4)}$	$f = 1.305$

Al iniciar el proceso de doblado del tubo la distribución de fuerzas se simplifica con dos empotramientos (sujeción por los dados), una carga distribuida que actúa sobre una longitud (L) de 15.504mm (apoyo generado por el árbol de doblado) y un momento plástico que genera esfuerzos a tensión y compresión (figs. 12a-b). El diagrama de cuerpo libre de la fig. 12c muestra la magnitud de las fuerzas resultantes en el sistema, en función de una carga última w_u que actúa sobre el tubo y permite doblarlo totalmente. En la tabla 5 se presentan los valores para cada una de las etapas por las cuales atraviesa el sistema al aumentar gradualmente la carga w , pasando por la carga de fluencia w_Y , la carga de plastificación w_i , hasta llegar a la carga última w_u .

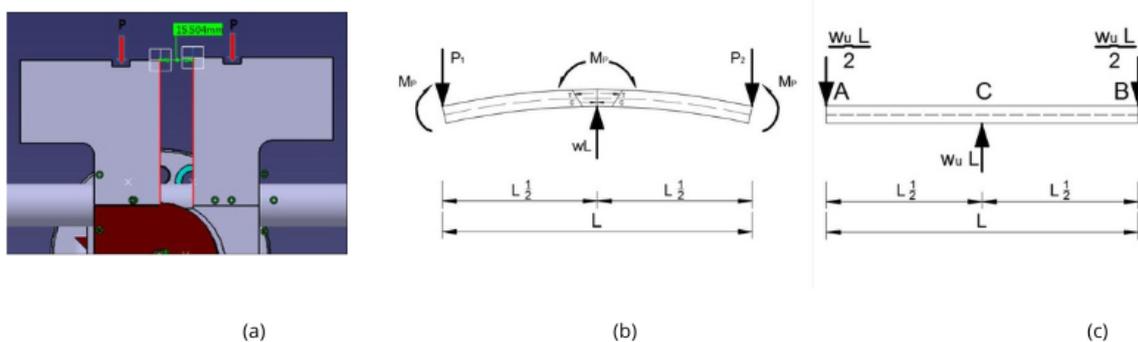


Figura 12: Diagrama de cuerpo libre del sistema al iniciar el doblado

Tabla 5: Resultados del análisis de carga.

Parámetro	Ecuación	Resultados
Carga de fluencia	$w_Y = \frac{12M_Y}{L^2}$	$w_Y = 2328.55 \text{ N/mm}$
Carga de plastificación	$w_i = \frac{12M_P}{L^2}$	$w_i = 2279.62 \text{ N/mm}$
Carga última	$w_u = \frac{16M_P}{L^2}$	$w_u = 3039.50 \text{ N/mm}$

Finalmente, considerando los puntos cargas que actúan en cada elemento del indicados en la fig. 12c, en la tabla herramental.

6 se muestran los valores de las

Tabla 6: Resultado de las fuerzas aplicadas en los elementos del sistema.

Ecuación	Resultados	Elemento del sistema
$R_A = \frac{w_u L}{2}$	$R_A = 23556.125 \text{ N}$	Dado de ajuste (Clamp)
$R_B = \frac{w_u L}{2}$	$R_B = 23556.125 \text{ N}$	Dado de presión (Pressure Die)
$R_C = w_u L$	$R_C = 47112.25 \text{ N}$	Árbol de doblado (Bend Die Body)

2.3 Presentación y discusión de resultados

Utilizando el módulo “*Analysis & Simulation*” del software de diseño CATIA V5, se realiza un análisis estático mediante elemento finito computacional del herramental, para determinar la distribución de esfuerzos por teoría

de Von-Mises durante el proceso de doblado del tubo. Se modela y discretiza el herramental aplicando las cargas correspondientes en cada uno de los dados, relaciones de contacto de deslizamiento, así como, restricciones de movilidad y fijas (fig. 13).

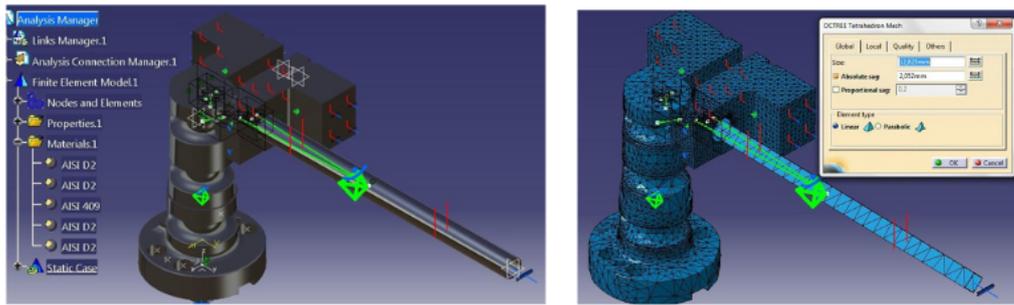


Figura 13: Condiciones de frontera y discretización del herramental

Se realizan dos simulaciones para concentración de esfuerzos en el árbol de doblado, empleando los aceros AISI-D2 y AISI-4140, respectivamente. En ambos estudios los demás componentes del herramental se modelan con acero AISI-D2 y el tubo con un AISI-409. La fig. 14 muestra magnitudes de los resultados numéricos para cada tipo de acero la zona de concentración de esfuerzos en el árbol de doblado y de acuerdo con la fig. 2 se coincide con la zona de fractura cuando el herramental falla por su operación, en la fig. 15 se muestran las simulaciones del desplazamiento. Por lo tanto, las magnitudes de los resultados numéricos se consideran confiables (ver tabla 7).

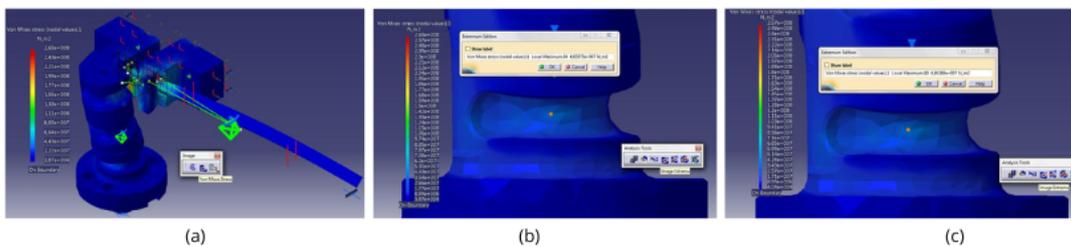


Figura 14: Localización del nodo de mayor esfuerzo en el árbol de doblado para el caso de análisis con acero AISI-D2 (b) y AISI-4140 (c).

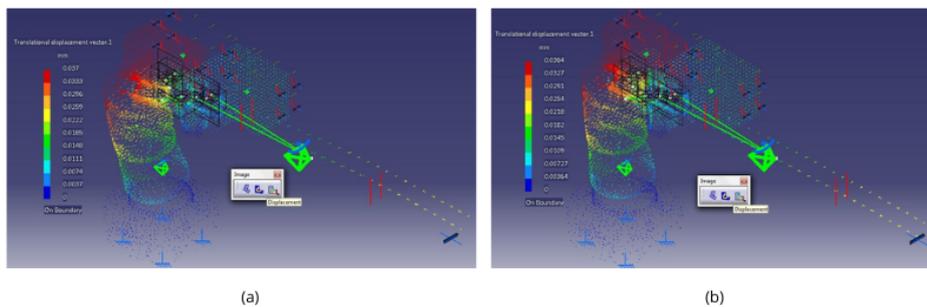


Figura 15: Visualización del análisis de desplazamiento del árbol de doblado para el caso de análisis con acero AISI-D2 (a) y AISI-4140 (b).

Tabla 7: Resultados por elemento finito computacional para cada caso de estudio en el árbol de doblado

ACERO AISI-D2		
Resultado.	Valor.	Ubicación con respecto a la base.
Esfuerzo max.	46.3375 MPa	25.00 mm
Deformación max.	36.7439 μm	150.00 mm
ACERO AISI-4140		
Resultado.	Valor.	Ubicación con respecto a la base.
Esfuerzo max.	48.0389 MPa	25.00 mm
Deformación max.	36.1108 μm	150.00 mm

Una vez desarrollado el análisis por elemento finito asistido por computadora, se calcula el factor de seguridad para cada uno de los casos de estudio, mediante:

$$F.S = \frac{S_Y}{S_{\text{Von-Mises}}}$$

Empleando la ecuación anterior, los factores de seguridad para los aceros AISI-D2 y AISI-4140 son 5.87 y 4.43, respectivamente. La diferencia entre los factores de seguridad es de 1.44. Esto quiere decir que al seleccionar un acero AISI-D2, este puede soportar una carga adicional de 144.0% con respecto al acero AISI- 4140.

Conclusiones

En este trabajo se realizó la caracterización, modelado y simulación computacional de dos aceros grado herramienta AISI-D2 y AISI-4140, con la finalidad de analizar el comportamiento de estos materiales en la fabricación de un herramental para el doblado de

tubos. El acero AISI-D2 muestra el comportamiento de un material frágil, mientras que el acero AISI-4140 de un material dúctil. Lo anterior indica que el acero AISI-D2 presenta una mayor rigidez. Las simulaciones por elemento finito computacional se validan en función del comportamiento que presenta el herramental durante su operación, lo cual permite analizar el comportamiento mecánico con los dos aceros antes mencionados. Las magnitudes de los campos de esfuerzo y desplazamiento, así como, el factor de seguridad entre estos materiales muestra valores muy cercanos. Por tal motivo se puede seleccionar el acero AISI-4140 como una alternativa para la construcción del árbol de doblado, sin comprometer su funcionamiento. Este material refleja un bajo costo a comparación del AISI-D2, debido a que este último es muy utilizado en procesos que requieren alta tenacidad y para su manufactura se requieren cortadores especiales.

Referencias

- [1] Åsberg, M.; Fredriksson, G.; Hatami, S.; Fredriksson, W.; Krakhmalev, P. "Influence of post

- treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 742, pp. 584-589, 2019.
- [2] Budynas, R. G.; Nisbett, R. G. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 10 ed. México, Mc Graw-Hill. 2019.
- [3] Katoch, S.; Singh, V.; Sehgal, R. “Mechanical Properties and Microstructure Evaluation of Differently Cryogenically Treated AISI-H11 Steel”, *Int. J. Steel Struct.*, vol.19, pp. 1381–1392, 2019.
- [4] Kumar, Satish; Nagaraj, Mohan; Bongale, Arunkumar; Khedkar, Nitin K. “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of AISI D3 tool steel”, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, vol. 10, no. 2, pp. 98-113, 2019.
- [5] Kunz, J.; Saewe, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Schleifenbaum, J.H.; Broeckmann, C. “Mechanical Properties of High-Speed Steel AISI M50 Produced by Laser Powder Bed Fusion”, *Steel research int.*, vol. 91, no. 5, pp. 1900562, 2020.
- [6] Martínez-Reyes, H. F.; Seth-Escobar, B.; Villegas-Mesa, J. A.; Murillo Yarce, L. C.; Marín-Chicaiza, J. S.; Ocampo, D. A. “Experiencias en el tratamiento térmico de aceros para aseguramiento de la validez de los resultados en dureza Rockwell C”. *Revista MODUM*, vol. 2, no. 1, pp. 110-129, 2020.
- [7] Mayén Chaires, J.; Segura, J. A.; Serna Barquera, S. A.; Molina Ocampo, A. “Evaluación de propiedades mecánicas de dos aceros grado herramienta AISI-O1, AISI-D2 y obtención de la concentración de esfuerzos en la geometría de mordazas de sujeción de especímenes compactos de tensión”, *Superficies y Vacío*, vol. 23, no. S, pp. 10-14, 2010.
- [8] Mazeeva, A. K.; Kim, A.; Shamshurin, A. I.; Razumov, N. G.; Nazarov, D. V.; Borisov, A. N.; Popovich, A. A. “Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of Ni36Co37Al27 alloy produced by laser powder bed fusion”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 938, pp. 168461, 2023.
- [9] Morral, F. R.; Jimeno, E.; Molera, P. *Metalurgia general. Tomos I y II*. 1 ed. México, Reverté, 2021.
- [10] OMNI-X MX. *Worldwide Leader in Bending Technology-Manual*, México, 2020. <https://www.omni-x.com/mx/es/>
- [11] Qin, S.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C. “Effects of Pressure on Microstructure and Residual Stresses during Hot Isostatic Pressing Post Treatment of AISI M50 Produced by Laser Powder-Bed Fusion”. *Metals*, vol. 11, 2021.
- [12] Qin, S.; Saewe, J.; Kunz, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Schleifenbaum, J.H.; Broeckmann, C. “Influence of Preheating Temperature on Microstructure Evolution and Hardness of High-Speed Steel AISI M50 Processed by Laser Powder Bed Fusion”, *Steel research int.*, vol. 94, no. 6, pp. 2200784, 2023.

- [13] ^bQin, S.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C. "Improving the Fatigue Strength of Laser Powder Bed-Fused AISI M3:2 by Hot Isostatic Pressing", *Steel research int.*, vol. 94, no. 4, pp. 2200435, 2023.
- [14] Sander, J.; Hufenbach, J.; Giebeler, L.; Wendrock, H.; Kühn, U.; Eckert, J. "Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting", *Materials & Design*, vol. 89, pp. 335-341, 2016.
- [15] Schmid, S. R.; Kalpakjian, S. *Manufactura Ingeniería y Tecnología: Ingeniería y Tecnología de Materiales*. 7 ed. México, Pearson, 2015.
- [16] Van Trinh, Trung; Nguyen, Son Anh; Gia Pham, Khanh; Seidel, Christian; Hoang Pham, Anh; Nhu Phung, Cuong. "Change in microstructure and hardness of additively manufactured AISI H13 steel by heat treatment and nitriding processes", *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, no. 2, pp. 82-87, 2023.
- [17] ^aXu, Guili; Huang, Peng; Feng, Zhanhao; Wei, Zhenxiong; Zu, Guoyin. "Effect of Deep Cryogenic Time on Martensite Multi-Level Microstructures and Mechanical Properties in AISI M35 High-Speed Steel", *Materials*, vol. 15, no. 19, pp. 6618, 2022.
- [18] ^bXu, Guili; Huang, Peng; Wei, Zhenxiong; Feng, Zhanhao; Zu, Guoyin. "Microstructural variations and mechanical properties of deep cryogenic treated AISI M35 high-speed steel tempered at various temperatures", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 3371, 2022.
- [19] Xu, Guili; Huang, Peng; Wei, Zhenxiong; Feng, Zhanhao; Zu, Guoyin. "Multiphase Microstructure Optimization to Enhance the Mechanical Properties of AISI M35 High-Speed Steel", *Steel research international*, vol. 94, no. 9, 2023.