



# **VALIDACIÓN DEL TORQUE DE DOBLEZ DE UNA BARRA O TUBO POR COMPRESIÓN MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Investigador principal:  
M.Sc. Javier Andrés Urbano Tole

Estudiante de investigación:  
Juan José González Palacio

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Programa de Ingeniería Mecánica  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



# **VALIDACIÓN DEL TORQUE DE DOBLEZ DE UNA BARRA O TUBO POR COMPRESIÓN MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Investigador principal:  
M.Sc. Javier Andrés Urbano Tole

Estudiante de investigación:  
Juan José González Palacio

Trabajo dirigido

Línea de Investigación:  
Diseño Mecánico  
Grupo de Investigación:  
Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica (DSIM)

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
Programa de Ingeniería Mecánica  
Bogotá D.C., Colombia  
2020



## Resumen

La modelación por medio de los elementos finitos de los procesos de conformado y de los fenómenos que intervienen, han brindado una herramienta de validación de los valores de fuerza o torque de dobléz para tubos y barras de acero. En este trabajo se presentan tres áreas de estudios (analítica, experimental y modelamiento) con las cuales se puede estimar el torque de dobléz por compresión en barras y tubos de acero, se presenta la adaptación de un modelo analítico ya existente, valores obtenidos por laboratorios y el desarrollo del modelo por simulación. Con el fin de lograr una representatividad de los resultados se realiza la comparación entre los modelos de estudio, es aquí dónde cobra importancia la comparación entre los datos obtenidos de manera experimental y los que brinda una herramienta de simulación por elementos finitos como ANSYS.

**Palabras clave: Doblez de tubos, Torque de dobléz, Elementos finitos.**



# Contenido

	Pág.
<b>Contenido.....</b>	<b>7</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>9</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Objetivos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Metodología .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 2. Estado del arte .....</b>	<b>13</b>
2.1. Consulta bibliográfica. ....	13
2.2. Descripción general del estado del arte relacionado .....	15
2.2.1 Estudio de experimentación.....	15
2.2.2 Estudios analíticos .....	15
2.2.3 Estudios de Modelamiento .....	16
<b>Capítulo 3. Marco teórico .....</b>	<b>19</b>
3.1. Proceso de doblez.....	19
3.2. Definiciones .....	21
3.3. Definición del modelo analítico.....	21
3.4. Definición del problema de modelamiento .....	26
3.5. Parámetros relacionados con el doblez .....	28
<b>Capítulo 4. Simulación.....</b>	<b>31</b>
4.1. Objetivo de la simulación .....	31
4.2. Descripción general del software.....	31
4.3. Simplificaciones geométricas aplicadas .....	31
4.4. Elementos finitos utilizados y condiciones de mallado.....	33
4.5. Determinación del tamaño de los elementos.....	35
4.6. Condiciones de frontera.....	36
4.7. Configuración de simulación.....	36
<b>Capítulo 5. Aplicación y resultados .....</b>	<b>42</b>
5.1. Plan de ensayos .....	42
5.2. Ensayos de laboratorio .....	42
5.2.1 Resultado de ensayo de laboratorio .....	43
5.3. Simulaciones y resultados .....	43
5.4. Comparaciones entre métodos de estimación .....	48
<b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>54</b>

---

# Lista de figuras

---

Figura 1. Estructura y ubicación de la investigación. ....	13
Figura 2. Esquema del proceso de doblado de una lámina, barra o tubo. ....	19
Figura 3. Configuración del proceso de doblado por compresión. ....	20
Figura 4. Dobrado de la barra en el avance máximo del rodillo compresor.....	20
Figura 5. Retroceso del rodillo compresor por el efecto del springback.....	21
Figura 6. Sección transversal de la barra, curva tensión vs deformación linealizada y perfil de tensiones en la barra (Arzola et al., 2007). Adaptada por autor. ....	23
Figura 7. Ancho de la sección transversal de la barra a la altura $y$ . ....	23
Figura 8. Ancho de la sección transversal a la altura $y$ para tubo. ....	25
Figura 9. Esquema de doblado a simular por método de elementos finitos. ....	26
Figura 10. Contacto rígido superficie-superficie entre la matriz y la barra. ....	27
Figura 11. Elementos hexagonal y tetraédrico utilizados en la simulación. ....	28
Figura 12. Geometrías de interés en la máquina dobladora (Urbano et al., 2017).....	32
Figura 13. Geometría simplificada a simular. ....	33
Figura 14. Elemento solid 185 utilizado en la malla del tubo y la barra. [20].....	34
Figura 15. Elemento Conta 174 utilizado para definir las condiciones de frontera. [20].....	34
Figura 16. Segmento del elemento Targe 170. [20].....	35
Figura 17. Configuración del análisis estructural. ....	38
Figura 18. Sujeciones y restricciones de movimiento en el modelo. ....	39
Figura 19. Configuración de máquina dobladora y sensor de torque. ....	42
Figura 20. Torque de doblez experimental para tubo de 9,605mm y espesor 2,7mm.....	43
Figura 21. Punto de estimación del torque de doblez. ....	44
Figura 22. Tendencia del torque de doblez simulado y analítico.....	44
Figura 23. Torque de doblez en función del radio de doblez.....	45
Figura 24. Torque de doblez por compresión en función del esfuerzo de fluencia.....	45
Figura 25. Torque de doblez por compresión en función del módulo tangente. ....	46
Figura 26. Variación del torque en función del ángulo de doblez para varios espesores. ....	47
Figura 27. Comportamiento del torque de doblez en determinados ángulos. ....	48
Figura 28. Springback en función de la variación del espesor de pared. ....	48
Figura 29. Torque de doblez según los distintos modelos para un espesor de pared de 2,7 mm. ....	49
Figura 30. Torque de doblez según los distintos modelos para una barra maciza. ....	50

---

## Lista de tablas

---

Tabla 1. Palabras claves de búsqueda.....	14
Tabla 2. Variables utilizadas en modelos de torque de dobléz. ....	22
Tabla 3. Parámetros de dobléz utilizados en el estudio .....	28
Tabla 4. Variación en la convergencia de la malla. ....	36
Tabla 5. Propiedades mecánicas del material utilizado para la comparación.....	37
Tabla 6. Material utilizado para estimar el torque en diferentes geometrías. ....	37
Tabla 7. material utilizado para estimar el torque en barra de 1 pulgada. ....	37
Tabla 8. Geometría del tubo simulado.....	38
Tabla 9. Porcentaje de error en función del torque experimental para el tubo. ....	49
Tabla 10. Porcentaje de error en función del torque experimental para la barra. ....	50

---



# Introducción

---

El programa de Ingeniería Mecánica ha diseñado y fabricado una máquina dobladora de tubos de sección circular para el laboratorio de ensamble, que permite realizar docencia e investigación en el ámbito del doblado de tubos y barras por compresión.

Con el fin de aumentar el conocimiento del proceso, se plantea una forma alternativa a la experimentación para validar el torque de doblado en tubos y barras por compresión utilizando los elementos finitos.

Se presentan factores que afectan el resultado del proceso de doblado por compresión como lo es la variación del espesor de pared y los fenómenos en los cuales se evidencian como lo es el aumento o disminución del valor del torque de doblado.

Este trabajo se destaca por presentar el desarrollo de un modelo de simulación de doblado de tubos y barras por compresión por elementos finitos, un enfoque que poco se encuentra en las investigaciones realizadas en el ámbito del doblado, basándose en un modelo analítico que requirió una adaptación con el fin de cumplir los objetivos propuestos y en resultados experimentales para determinar la convergencia entre los valores obtenidos y su posible validación.

## 1.1. Objetivos

### General

Determinar el torque de doblado de una barra o tubo por medio de una simulación, utilizando un método de elementos finitos (FEM) y comparar los resultados con ensayos de laboratorio.

### Específicos

1. Generar un estado del arte de modelos que permitan estimar el torque para doblado aplicado en tubos y barras.
  2. Identificar y caracterizar los factores principales que influyen en el proceso de doblado de tubos y barras por compresión desde la literatura existente.
  3. Simular el proceso de doblado por compresión de una barra o tubo usando el software ANSYS.
  4. Comparar y analizar resultados obtenidos por el modelo, con literatura y datos existentes para la validación del modelo.
- 
-

## 1.2. Metodología

En el desarrollo de esta investigación aplicada se utiliza la metodología analítica experimental, dónde se analiza cada uno de los parámetros relevantes que intervienen en el doblado de tubos y barras. El inicio de cada actividad está sujeto a la finalización de la anterior y entre el final de una actividad y el inicio de la otra debe de existir un tiempo de verificación que permita establecer si las actividades cumplen satisfactoriamente los objetivos del trabajo, por lo cual se estructura del siguiente modo:

- Revisión del estado del arte relacionado con el análisis y modelamiento del proceso de doblado en elementos metálicos.
  - Realizar una selección y caracterización de los parámetros requeridos para simular el fenómeno.
  - Definir materiales y geometrías relacionadas con el estudio.
  - Consultar metodologías para el modelamiento de procesos de doblado y seleccionar la más adecuada.
  - Adquirir experiencia y aplicar una metodología de modelado por elementos finitos en el software ANSYS.
  - Validar el modelo.
  - Comparar con el caso experimental.
-

## Capítulo 2. Estado del arte

Con el fin de contextualizar la investigación y mostrar a grosso modo su estructuración y ubicación dentro del ámbito científico, se presenta la figura 1, donde se puede observar de manera panorámica la forma en que evoluciona cada fase del fenómeno a estudiar. Situando el estudio en el modelamiento por elementos finitos de procesos de conformado, mediante la técnica de doblez por compresión de tubos y barras de acero.

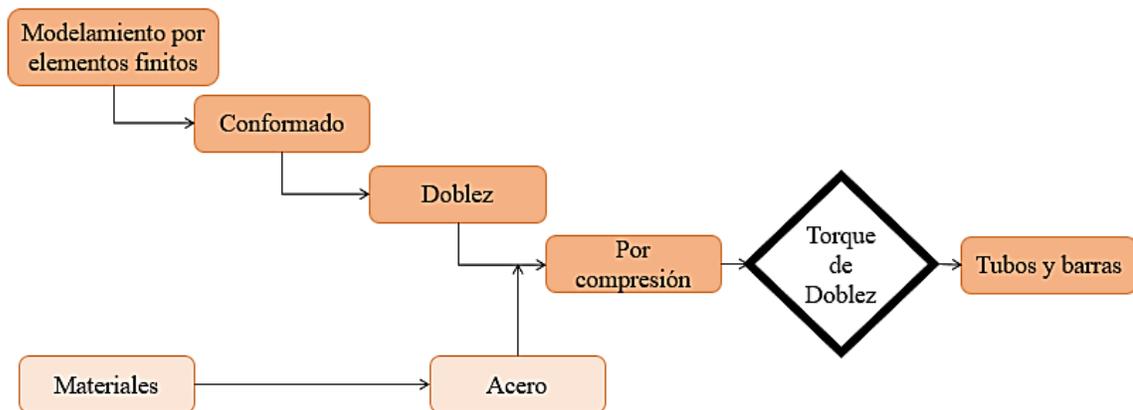


Figura 1. Estructura y ubicación de la investigación.

Siendo el torque de doblez una de las fase que ha llevado a realizar diversas investigaciones en cuanto al conformado, debido que brinda a este un mayor grado de control sobre el proceso de doblez de tubos y barras. Con la estructura del proceso establecida, es posible identificar qué áreas de estudio permiten obtener información con la cual se pueda fundamentar el estado del arte.

### 2.1. Consulta bibliográfica.

Teniendo en cuenta las áreas de estudio identificadas por medio de la figura 1, es posible establecer palabras claves en español e inglés (en algunos casos es su idioma natural), que se relacionan con el estudio y las revistas más influyentes en cuanto a indagaciones realizadas en este campo.

Revistas internacionales

- Journal of Machine tool & manufacture
- Journal of Materials Processing Technology
- Nippon steel Technical report
- Ciencia y tecnología URBE
- International Journal of Solids and Structures

## Revistas colombianas

- Ingeniería y competitividad
- Ciencia e ingeniería
- Revista de ingeniería

En la en la siguiente tabla (Tabla 1), se presentan palabras claves empleadas en la búsqueda de bibliografía.

<b>Español</b>	<b>Inglés</b>
Doblado de tubos	Tube bending
Fuerza de doblado	Bending force
Par de doblado	Bending torque
Recuperación elástica	Springback
Doblez de barra plana	Flat bar bending
Performance tube bending	Rendimiento de doblado de tubos
Análisis de elementos finitos	Finite element analysis
Tipo de doblez	Bending type
Energía de doblado	Bending power

Tabla 1. Palabras claves de búsqueda.

En complemento a lo anteriormente mencionado se presenta un listado de universidades y organizaciones que han realizado aportes en cuanto a investigación y desarrollo:

- Texas A&M University, USA.
- Department of Manufacturing Engineering, Faculty of Machine Building B-dul Muncii, Romania.
- Department of Mechanical and Materials Engineering, University of Western, Canada.
- Universidad del Bio-Bio, Departamento de ingeniería mecánica, Chile.
- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, , Sede Bogotá, Colombia.
- Rzeszo Âw University of Technology, Poland.
- Instituto Tecnológico de Aeronautica, Sao Jose Dos Campos, Brazil.
- Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- Universidad EAFIT, departamento de ingeniería mecánica, Colombia.
- Universidad de los Andes, Departamento de ingeniería mecánica, Colombia.
- WorldAutoSteel

## 2.2. Descripción general del estado del arte relacionado

El proceso de conformado mediante el doblado de tubos y barras, es uno de los procesos a los cuales se le ha dedicado grandes recursos en materia de investigación en los últimos años, debido a la gran importancia que toman en el mercado actual las piezas conseguidas por medio de este método. Un doblado de tubo o barra de acero puede ser llevado a cabo por 7 métodos diferentes [1], que serán mencionados más adelante.

Donde nos enfocaremos en el doblado por compresión por ser el caso de estudio, la pieza de trabajo es sujeta por una prensa, la cual le ofrece estabilidad a la barra o tubo. La barra se dobla alrededor de la matriz estacionaria con la ayuda de una zapata o matriz móvil. Mediante este método se pueden realizar doblados cercanos entre sí sin la necesidad de usar matrices compuestas, como en el caso del doblado por arrastre.

Son diversos los enfoques que tienen los estudios sobre doblado de tubos y barras de acero, por lo cual el modo de abordarlo puede variar según sean los resultados a los que se quieren llegar, es aquí donde el desarrollo se divide en tres partes importantes; el enfoque experimental, el enfoque analítico y el enfoque por medio de modelamientos.

El enfoque experimental se presenta cuando se posee la máquina dobladora y existe la posibilidad de medir el torque de doblado para tubos o barras de acero, de este modo los resultados obtenidos son producto de la práctica. Mientras que en el estudio analítico se llega a un resultado por medio de las teorías y ecuaciones en las que se fundamenta el proceso de conformado y por último el análisis por medio de modelamiento utilizado en la mayoría de los estudios para validar los resultados obtenidos por el enfoque experimental o analítico.

### 2.2.1 Estudio de experimentación

- Diseño y evaluación de prototipo para doblar barras de acero [2].
- Diseño y construcción de una máquina dobladora de tubos hidráulica [3].
- Procesos de doblado de tubos y análisis de resultados [4].

El objetivo de esta sección es brindar resultados obtenidos en procesos de doblado de tubos y barras de manera experimental, para comparar con los resultados proporcionados por el modelo analítico utilizado y posteriormente llevar a cabo el estudio. Cuando se comparó el modelo analítico con los datos del estudio de los autores (Vidal et al., Sin fecha), se obtuvo una desviación de los resultados aproximadamente del 7%, un valor aceptable considerando la naturaleza de ambas mediciones. En esta sección también se presentan artículos que permitieron identificar como se realiza el cálculo del torque de doblado de manera experimental [3]. Del mismo modo se encuentran artículos que presentan la variación de los fenómenos como el espringback en función del del diámetro de la barra [4].

### 2.2.2 Estudios analíticos

- Análisis y síntesis de la planeación del proceso de doblado [5].
- Análisis elástico-plástico del doblado de tubo tubo [6].

- Doblado de codos de cobre [7].
- Rediseño y optimización de una maquina dobladora [8].
- Pautas de aplicación avanzadas de aceros de alta resistencia [9].

En esta sección se encuentran los autores que abarcaron la problemática del doblado de tubo y barras desde un punto analítico, está caracterizada por la variedad en que se realiza, se pueden encontrar autores que utilizan un modelo simple con ecuaciones de la mecánica de materiales para determinar el torque de doblado necesario para realizar el proceso de doblado y otros que van mucho más allá como el caso de (Al-Qureshi., 1998) y (Arzola et al., 2007), donde el estudio del primero se caracteriza por tener en cuenta la variación de la distancia que hay entre el eje neutro y la fibra más alejada de este, a medida que se va produciendo el proceso de doblado, fenómeno que se presenta en todos los elementos que son sometidos al doblado en un determinado ángulo de doblado [6]. Mientras que el segundo para su estudio considera que esta distancia permanece constante a medida que el proceso de doblado ocurre y la fuerza de doblado solo dependerá de propiedades del material y configuraciones geométricas del proceso [8].

Como consecuencia del proceso de doblado se presenta el adelgazamiento de paredes, aplanamiento de la sección transversal y la producción de arrugas, que pueden ser controlados por los parámetros de espesor, diámetro del tubo, el radio de doblado, la presión interna y el esfuerzo axial en la fibra del tubo [5], el método analítico de este autor (Ortega et al., 2013) es más complejo al involucrar mayor número de variables que se desean controlar en el proceso de doblado. Todos estos estudios se caracterizan porque relacionan las propiedades geométricas del sistema y las propiedades mecánicas del material, variando el enfoque de estudio, como en el caso que se plantea que el grosor de la pared en la región que se encuentra a tensión es más delgado que el que se encuentra a compresión (Stachowicz., 2000), este autor relaciona la energía necesaria para realizar el doblado del tubo teniendo en cuenta que los esfuerzos de deformación varían en compresión y tensión [7]. Por último se encuentra el modelo utilizado por (Keeler et al., 2014) donde establece una relación entre el espesor del tubo y su diámetro para evitar la producción de defectos en el proceso [9].

### **2.2.3 Estudios de Modelamiento**

- Doblado de tubos con tracción axial y presión interna [10].
- Simulación por elementos finitos del doblado de tubo [11].
- Tubos de acero de alta resistencia para vigas de impacto [12].
- Doblado de barras no homogéneas [13].

Por último se presentan los estudios relacionados que dieron solución al problema de doblado desde el punto de vista de modelamiento, como lo es en el caso de la variación del espesor de la pared en el proceso de doblado (Ceclan et al., 2007) a diferentes ángulos de doblado, determinando que este es uno de los parámetros más importantes en el proceso, así como la ovalidad que presenta el área transversal (Stachowicz, 1999) de la barra o tubo, es un proceso que no se puede evitar pero se

controla. Otro de los estudios enfocaba sus esfuerzos en determinar cómo variaba el espesor de la pared en función del ángulo de doblado y compararlo con los resultados que se obtenían experimentalmente (R. Agarwal., 2004).

---



## Capítulo 3. Marco teórico

### 3.1. Proceso de doblez

Este método de conformado basa su principio en aplicar fuerzas en una dirección diferente al eje neutro y que esta supere el límite elástico, de modo que el material luego de sobrepasar el límite de cedencia experimentará una deformación plástica permanente, es decir, se genera la curvatura como se muestra en la figura 2.

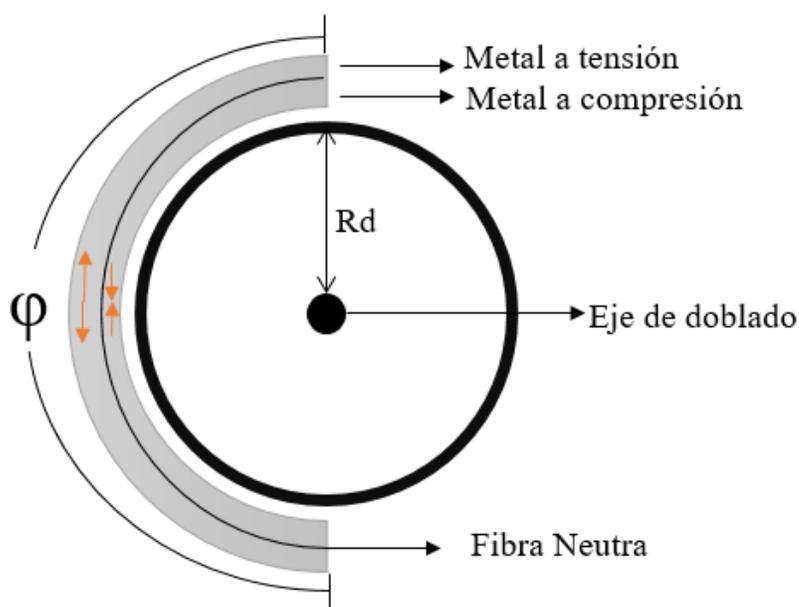


Figura 2. Esquema del proceso de doblado de una lámina, barra o tubo.

El doblado de tubos se puede realizar mediante trabajo en caliente o trabajo en frío, pero preferiblemente se trabaja en frío, ya que cuando ocurre la deformación plástica el material presenta un endurecimiento en la zona deformada que para efectos de propiedades mecánicas resulta beneficioso, mientras que si el doblado se realiza en caliente, el material puede experimentar una recrystalización y con esto una disminución de la resistencia mecánica de la pieza que se está conformando.

El proceso de doblado por compresión se configura como se muestra en la figura 3, donde presenta los parámetros más importantes del proceso.

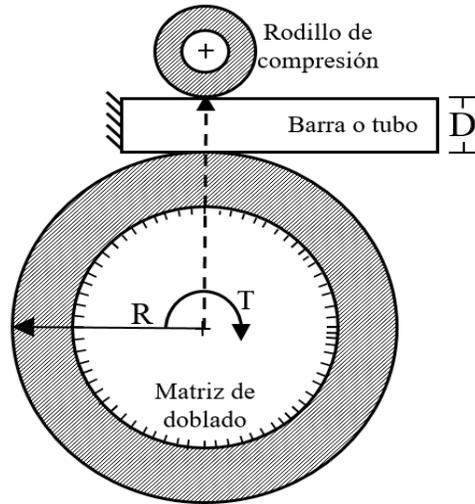


Figura 3. Configuración del proceso de doblado por compresión.

Cuando el torque de doblado es aplicado, el rodillo compresor se desplaza de manera tangencial a la matriz de doblado hasta llegar al avance máximo o ángulo de doblado, como se observa en la figura 4.

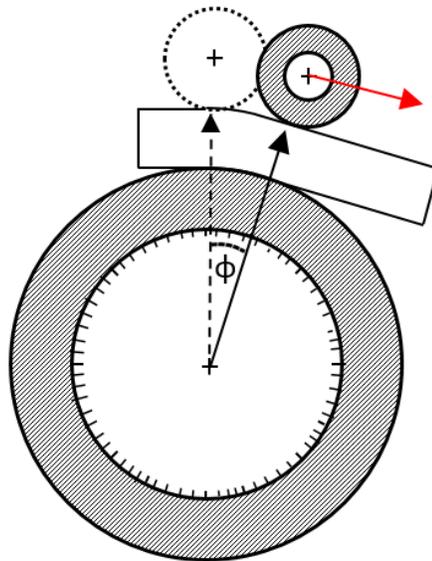


Figura 4. Doblado de la barra en el avance máximo del rodillo compresor.

Cuando se deja de aplicar el torque de doblado, la barra experimenta un fenómeno conocido como springback o recuperación elástica, donde el rodillo compresor es obligado a retroceder unos grados por efecto de la barra, como se muestra en la figura 5.

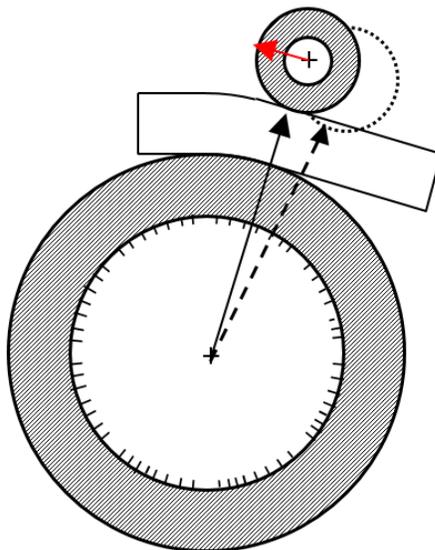


Figura 5. Retroceso del rodillo compresor por el efecto del springback.

### 3.2. Definiciones

$t$	Espesor inicial de la pared del tubo
$R$	Radio medio de curvatura o radio de doblez
$d$	Diámetro externo
$d_{int}$	Diámetro interno
$\varepsilon$	Deformación normal unitaria
$\varepsilon_{ys}$	Deformación normal unitaria para el comienzo del flujo plástico
$\sigma_{ys}$	Límite de fluencia del material
$\sigma$	Tensión sobre el material de la barra
$H$	Pendiente de la curva esfuerzo-deformación en el rango plástico
$I$	Inercia de la sección a doblar
$y$	Posición de la fibra respecto al eje neutro
$y_f$	Altura respecto a la que se divide la zona plástica de la elástica
$E$	Módulo de elasticidad
$b$	Ancho de la sección a la altura $y$ del eje neutro
$M_f$	Momento flector necesario para el doblado.
$C$	Distancia entre el eje neutro y la fibra más externa
$\varphi$	Angulo de doblez

### 3.3. Definición del modelo analítico

Con el fin de validar los resultados obtenidos en el modelo de elementos finitos, en este trabajo se utiliza el modelo analítico desarrollado en el estudio de (Arzola et al., 2007), que analiza el doblado de barras de una manera sencilla teniendo en cuenta solo las propiedades del material a doblar y las

características geométricas de la barra, es por la simplicidad en la utilización de variables que se escoge como modelo analítico guía como se muestra en la tabla 2, es decir, no tiene en cuenta algunos parámetros que en la industria son de relevancia, como lo son la variación de espesor de pared, la ovalidad del área transversal y la aparición de arrugas en la superficie. Se basa en la existencia de una flexión elastoplástica en el material de la barra que se dobla, es válido aclarar que este modelo se encuentra planteado para barras y fue necesario realizar la adaptación y validación para el doblado de tubos.

Parámetros		Autores									
		[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
<b>Material</b>	E. Fluencia	x	x	x	x	x	x	x	x		x
	E. Último	x		x	x		x				
	M. Elasticidad	x	x	x	x	x		x	x		x
	M. Tangente					x					
	Elongación						x				
	Dureza										
	Springback										
	Fricción			x				x	x		x
<b>Configuración</b>	Radio de doblado	x	x	x	x		x		x	x	x
	Factor de pared		x				x				
	Grado de doblado		x							x	
	Vel. Deformación	x									
	Ovalidad							x			
<b>Proceso</b>	Tipo de doblado	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Torque de doblado	x		x		x					x
	Ángulo de doblado	x									
	Fuerza de doblado							x		x	
	Energía									x	
<b>Geometría</b>	Diámetro interno	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Diámetro externo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Variación del eje			x							
	Espesores		x	x			x	x	x	x	x
	Distancia entre centros	x									

Tabla 2. Variables utilizadas en modelos de torque de doblado.

Al analizar este modelo es importante tener en cuenta que se consideran los esfuerzos producidos a tensión iguales a los esfuerzos que se producen a compresión, como se ilustra en la figura 2, aunque esta consideración no es errónea para algunos materiales, es frecuente encontrar que los esfuerzos que soporta un material a compresión suelen ser mayores que los que soportan a tensión.

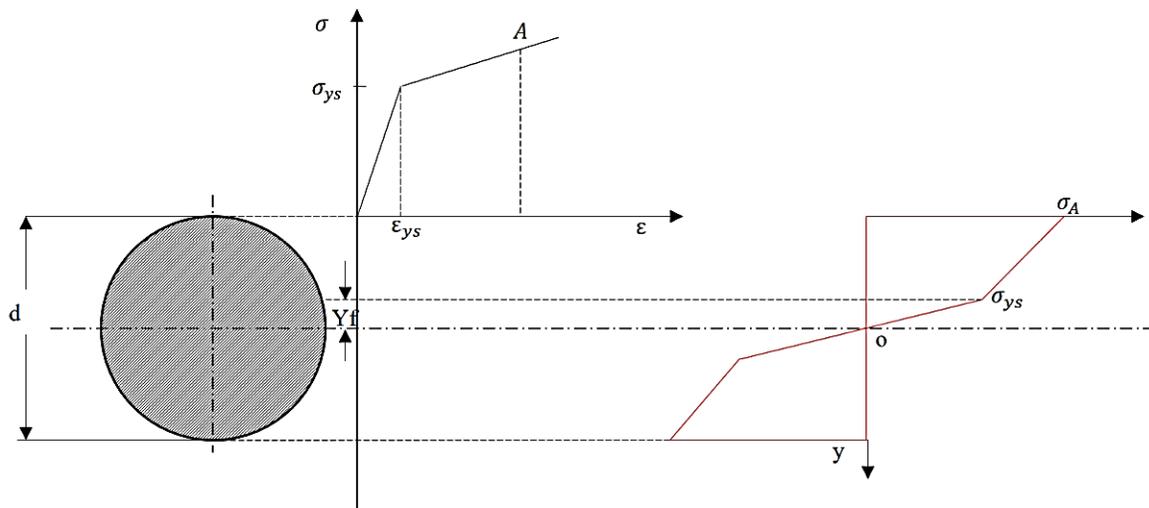


Figura 6. Sección transversal de la barra, curva tensión vs deformación linealizada y perfil de tensiones en la barra (Arzola et al., 2007). Adaptada por autor.

La teoría de flexión elastoplástica se caracteriza por estar dividida en dos zonas, una de ella donde se encuentra la deformación elástica y la otra donde se encuentra la deformación plástica, donde el punto en el que se dividen las dos deformaciones equivale a la deformación normal unitaria.

La distribución de esfuerzo en la barra varía en función del ancho de la sección transversal, que a su vez depende de  $Y$  (mm) que es la distancia a la que se encuentra la fibra respecto al eje neutral, como se observa en la figura 6.

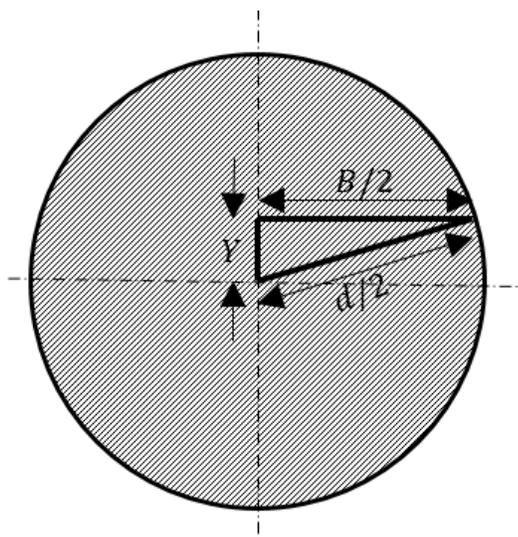


Figura 7. Ancho de la sección transversal de la barra a la altura  $y$ .

Por lo cual es posible calcular el ancho de sección B (mm), por medio de la siguiente expresión:

$$B = 2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - y^2} \quad (1)$$

Las dos zonas previamente mencionadas se encuentran divididas por  $Y_f$ (mm), que hace referencia a la altura respecto al eje neutro y se puede hallar así:

$$Y_f = \frac{\sigma_{ys} * R}{E} \quad (2)$$

Donde  $\sigma_{ys}$  (MPa) es el límite de fluencia del material a doblar, E (MPa) es el módulo de elasticidad del material y R(mm) el radio medio de curvatura.

Con el perfil de esfuerzos presentado en la figura 7 y el ancho de sección, es posible calcular el momento flector  $M_f$ (N mm) que se debe aplicar a la barra para lograr deformarla, se consigue por medio de:

$$M_f = \int_{-d/2}^{d/2} \sigma B y dy = 2 \int_0^{Y_f} \sigma B y dy + 2 \int_{Y_f}^{d/2} \sigma B y dy \quad (3)$$

La linealización de la curva esfuerzo deformación que se presenta en la figura 2, es posible gracias a las ecuaciones 4 y 5 que corresponden a la zona elástica y la zona plástica respectivamente

$$\sigma = \frac{E y}{R} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_{ys} \left(1 - \frac{H}{E}\right) + \frac{H y}{R} \quad (5)$$

Donde H (MPa) hace referencia a la pendiente del rango plástico en la curva esfuerzo deformación y la cual corresponde a la diezmilésima parte de la pendiente en la zona elástica.

De modo que al resolver la ecuación 3, queda la expresión:

$$M_f = \frac{\sigma_{ys}}{3} \left(1 - \frac{H}{E}\right) \left[ \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{ys} R}{E}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + \frac{\sigma_{ys} d^2}{8} \left(1 - \frac{H}{E}\right) \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{ys} R}{E}\right)^2} + \frac{(E - H) d^4}{32 R} \sin^{-1} \left(\frac{2 \sigma_{ys} R}{E d}\right) + \frac{\pi H d^4}{64 R} \quad (6)$$

Esta ecuación es la que relaciona el momento flector necesario para el doblez de la barra y las propiedades elastoplásticas, resistencia mecánica y geometría de la barra.

De esta misma manera se realiza el análisis para un tubo, donde la geometría varía ya que pasa a ser una sección tubular, con esto varía el ancho de sección a la altura  $Y_f$  como se muestra en la figura 8 y la inercia de la barra.

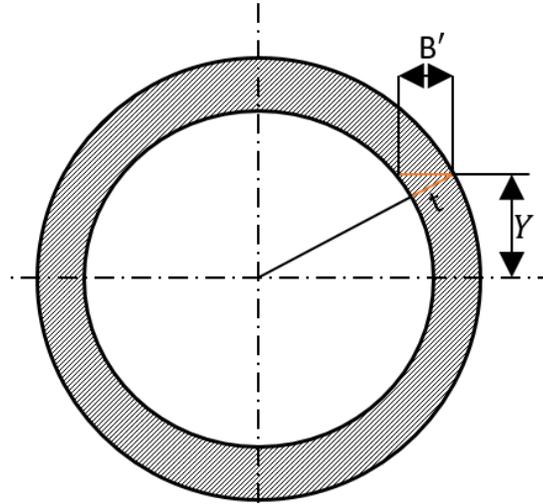


Figura 8. Ancho de la sección transversal a la altura de y para tubo.

La variable de interés  $B'$  es posible calcularla por semejanza de triángulos y se encuentra en función de la diferencia de los diámetros ( $t$ , mm) y el ancho de sección de barra, como se muestra:

$$B' = \frac{2Bt}{d} = \frac{(t)}{d} \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - y^2} \quad (7)$$

De modo que la expresión para calcular el momento flector en un tubo queda reescrita de la siguiente manera:

$$M_f = \frac{\sigma_{ys}}{3} \left(1 - \frac{H}{E}\right) \left[ \frac{d^2 - d_{int}^2}{4} - \left(\frac{\sigma_{ys}R}{E}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + \frac{\sigma_{ys}(d^2 - d_{int}^2)}{8} \left(1 - \frac{H}{E}\right) \sqrt{\left(\frac{d^2 - d_{int}^2}{4}\right) - \left(\frac{\sigma_{ys}R}{E}\right)^2} + \frac{(E - H)(d^4 - d_{int}^4)}{32R} \sin^{-1} \left(\frac{2\sigma_{ys}R}{Ed}\right) + \frac{\pi H(d^4 - d_{int}^4)}{64R} \quad (8)$$

### 3.4. Definición del problema de modelamiento

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un medio continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio continuo regirán también el del elemento [12], ya que con esto se logra discretizar el sistema, pasando de continuo con infinitos grados de libertad a un sistema que se puede estudiar su comportamiento como finito con grados de libertad conocido o lo puede determinar el desarrollador. Este método o herramienta ha resultado de vital importancia para la solución de problemas en la ingeniería y para su respectivo análisis, una muestra de esto es la alta dependencia a la que se ven sometidos los estudiantes, universidades y empresas a los software de modelación que emplean estos métodos.

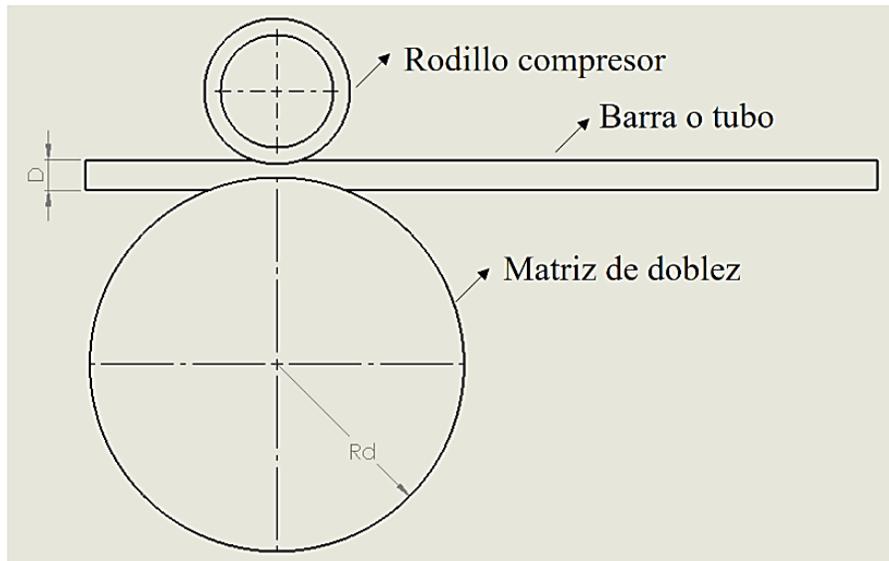


Figura 9. Esquema de doblado a simular por método de elementos finitos.

Cuando se realiza el análisis por este método las variables de entrada deben ser previamente establecidas, como se muestra en la figura 9, las variables geométricas del doblado, debido a que con esta se controla el fenómeno y se realiza el análisis según varíen los resultados en relación a esta, es muy posible que cuando un parámetro esté por fuera de rango o no se encuentre en la magnitud adecuada, el software pueda indicar una inconsistencia. Pero cuando esto no pase es el desarrollador el encargado de determinar si los resultados concuerdan con la literatura o ensayos experimentales, es aquí donde cobra importancia la validación del método.

En el modelamiento, son varios los factores que se deben tener en cuenta para garantizar resultados lo más acertado posible, iniciando por la geometría que debe ser representativa de las condiciones originales, ya que el radio de la matriz y diámetro de la barra afecta de manera directa el cálculo de la fuerza de doblado, cuando la geometría ya se encuentra definida como muestra la figura 8, es importante determinar el tipo de contactos que se produce entre las piezas, en este caso se utiliza un contacto superficie-superficie como se muestra en la figura 10, que se caracteriza por tener en cuenta la fricción que se produce entre las dos superficies y por permitir el deslizamiento entre las mismas, hechos que se presentan en la realidad.

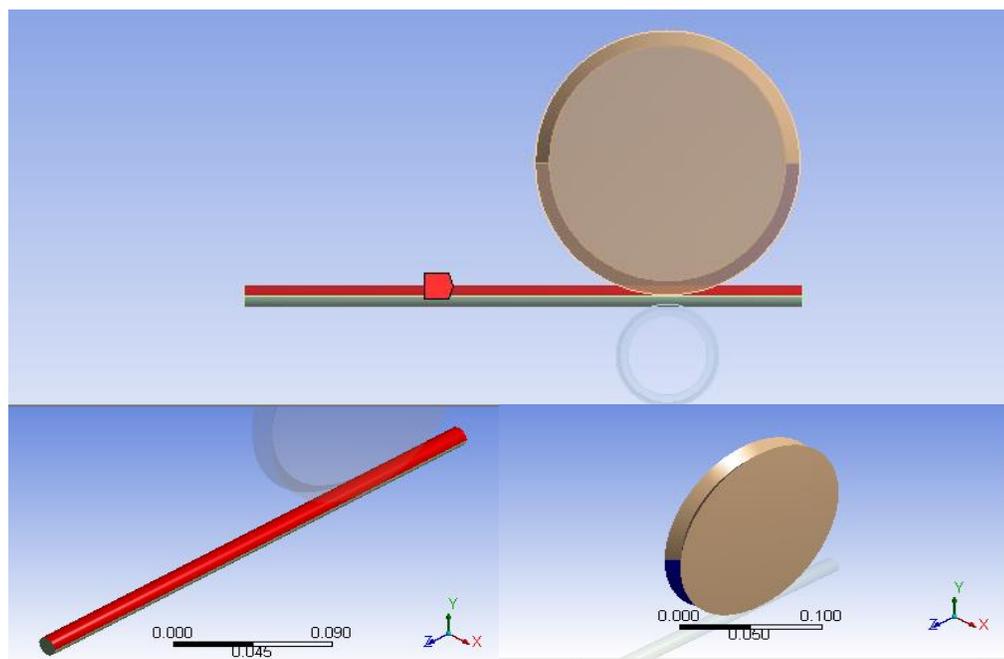


Figura 10. Contacto rígido superficie-superficie entre la matriz y la barra.

Es muy importante cómo se aplica la carga en el modelo, en este caso el encargado de aplicar la fuerza a la barra para conseguir la deformación requerida es el rodillo de compresión. No se recomienda aplicar fuerzas en sitios puntuales ya que esta puede ocasionar errores como el shear locking y el hourglassing que crean una distorsión en el modelo produciendo un efecto de zigzag por condiciones físicamente imposible, pero que el sistema trata de resolver, también puede ocasionar el modelamiento erróneo de las deformaciones por cortante en los elementos, si se presentan estos errores elementales se pueden controlar refinando la malla sacrificando y tiempo, aplicando la carga en forma de presiones, controlando las velocidades de deformación que recomendablemente deben ser bajas y utilizar elementos con rigidez elástica. El hourglassing puede ser monitoreado por medio de la sumatoria de energías presentes en el sistema mientras se realiza la simulación, es recomendable invalidar los resultados si su valor supera del 5% al 10% [13], dependiendo que tanta rigurosidad se necesite en el estudio.

Otro de los factores importantes es la generación de la malla, donde se pueden generar diversos tipos de elementos con diferentes tamaños, en función de lograr la mínima distorsión posible de las geometrías, esta es importante porque entre más se ajuste al modelo los resultados serán más acertados pero a un costo de tiempo y capacidad computacional [13], para este estudio se tuvo en cuenta dos tipos de elementos en tres dimensiones por la naturaleza del modelo, los hexaedros para la barra y perfil de la matriz y los tetraedro para el perfil de la matriz y el rodillo compresor como se aprecia en la figura 11.

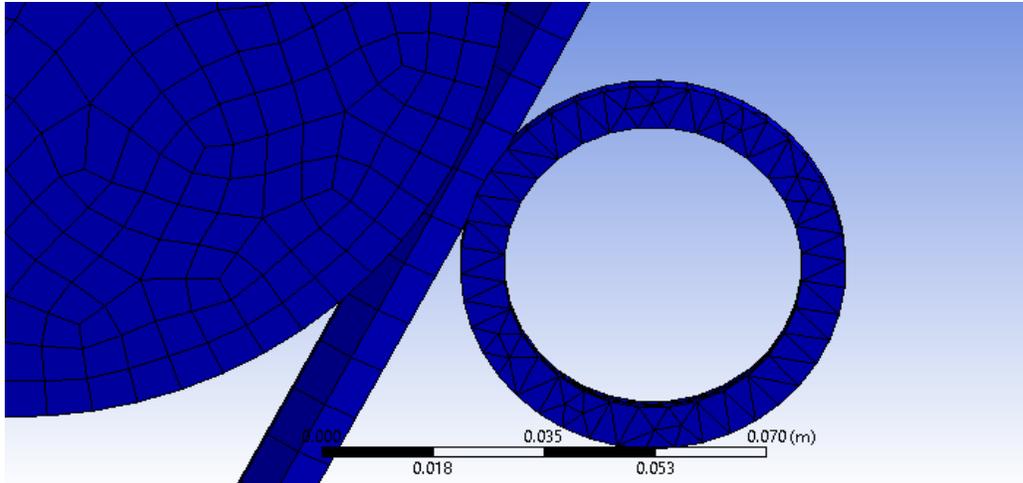


Figura 11. Elementos hexagonal y tetraédrico utilizados en la simulación.

### 3.5. Parámetros relacionados con el doblado

Son diversos los parámetros relacionados con el doblado en general, se tienen en cuenta según dónde se encuentre ubicada la investigación, estos pueden ser agrupados en cuatro grandes grupos; según las propiedades mecánicas del material a doblar, la configuración de doblado, la geometría y el proceso en el que se realiza. Las propiedades mecánicas como el esfuerzo de fluencia, la elasticidad del material, dureza, entre otros, tienen gran relevancia en el proceso de doblado [14], hecho que se hace evidente cuando se utilizan metodologías analíticas como las utilizada por (Arzola et al., 2007), donde las propiedades mecánicas del material se le atribuye la mitad del proceso. Luego se encuentra el grupo de las configuraciones donde se organizan los parámetros geométricos tanto de la barra o tubo como los de la matriz de doblado [15], entre los cuales se encuentran diámetros, espesores, radio de doblado, longitud entre centros, factor de curvatura, factor de doblado, entre otros. Por último se encuentra el grupo de proceso, donde se establece por cuál método se realiza el doblado, ya que dependiendo del tipo de doblado se debe aplicar una mayor fuerza o torque de doblado, teniendo en cuenta que se presenta mayor o menor fricción según la disposición de la matriz y demás rodillos de doblado.

Para el análisis del modelo en estudio, las variables utilizadas solo se encuentran en las categorías de materiales y configuraciones como se muestra en la tabla 3.

<b>Materiales</b>	<b>Configuraciones</b>
Esfuerzo de fluencia	Radio de doblado
Módulo de elasticidad	Diámetro interno
Pendiente del rango plástico	Diámetro externo

Tabla 3. Parámetros de doblado utilizados en el estudio

Otro de los parámetros importantes en el proceso de doblado es el conocido Springback o recuperación elástica, si bien no se relaciona con el modelo analítico desarrollado, este es un fenómeno relevante

que mediante el método de modelamiento se pueden obtener resultados de interés, el Springback se presenta cuando se realiza el proceso de conformado por doblado y ocurre la deformación elastoplástica, la porción deformada plásticamente permanecerá deformada, mientras que la porción deformada elásticamente tratará de volver a su condición inicial, esto acompañado del comportamiento de algunos metales que su distribución de esfuerzo en el proceso de doblado no coincide para la fibra que se encuentra a tensión con la fibra que se encuentra a compresión, debido a que los esfuerzos requeridos para deformar a compresión son mayores, modificando la geometría final del conformado. Este efecto en el proceso se relaciona con la geometría, el material que constituye la pieza, las dimensiones de las herramientas, los espesores, diámetros, temperatura y las magnitudes de fuerzas y esfuerzos aplicados, pero analíticamente no existe un proceso que relacione todas estas variables, se encuentran múltiples modelos en los cuales se les da manejo a algunas de estas de modo que el problema se simplifica [16].

---



---

## Capítulo 4. Simulación

---

El modelo se simula con la herramienta *Static Structural* del software ANSYS, la cual permite realizar un análisis por métodos iterativos que consta de la solución de matrices lo que hace que se requiera una capacidad computacional considerable. Se basa en el método para solucionar problemas de elementos finitos con modelos numéricos por medio de aproximaciones discretas, así discretiza el modelo físico convirtiéndolo en elementos de menor tamaño conectados entre sí por medio de nodos utilizados para relacionar las variables de estudio.

### 4.1. Objetivo de la simulación

Desarrollar un modelo que permita estimar el torque de doblado de una barra o tubo por compresión, además de que permita predecir el comportamiento de los fenómenos de ovalamiento y springback a medida que se varía la geometría de la barra o tubo simulados.

### 4.2. Descripción general del software

ANSYS es de una de las herramientas más utilizadas en la solución de problemas de ingeniería, que basa su análisis en la solución de elementos finitos, este hecho le permite al usuario tomar control de los parámetros que intervienen en la simulación desde los elementos más pequeños que la componen.

De este software es destacable la capacidad que tiene para simular diferentes entornos a los que se puede ver sometido el sistema en estudio, así mismo, se puede adaptar a la necesidades del proyecto que se lleva a cabo en cuanto a capacidad computacional, factores como el número de elementos de la malla que afectan en el tiempo de simulación se pueden modificar dependiendo la necesidad, de este modo se brindan resultados con un mayor grado de precisión a coste de mayor tiempo y capacidad de máquina, o por lo contrario en estudios donde no se requiera precisión se pueden obtener resultados de interés en tiempos cortos.

### 4.3. Simplificaciones geométricas aplicadas

En el desarrollo del modelo es necesario establecer las piezas y geometrías que determinan la configuración del doblado, de este modo se selecciona la matriz de doblado, el rodillo compresor y la barra o tubo a simular, como se presenta en la figura 12.

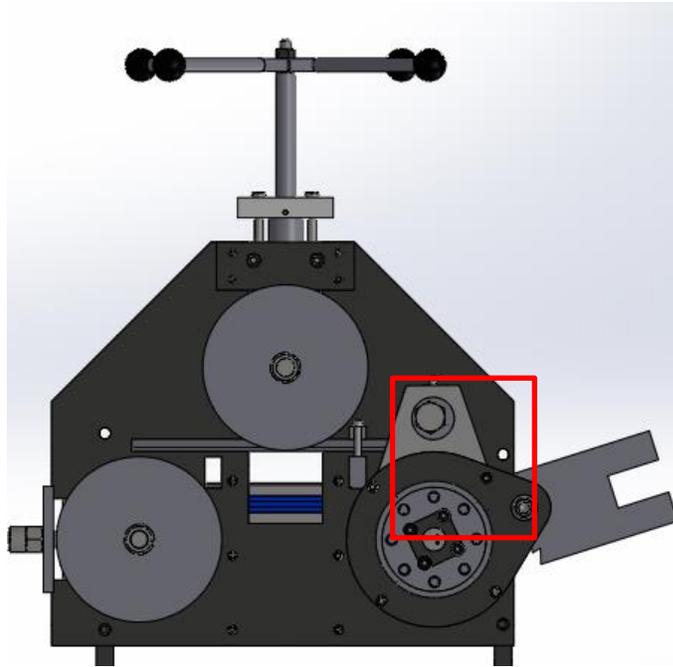


Figura 12. Geometrías de interés en la máquina dobladora (Urbano et al., 2017)

Existen piezas que por su diseño presentan líneas naturales de simetría o antisimetría, esto permite simplificar el proceso de análisis por medio de los elementos finitos, ya que es posible solucionar el problema para una parte determinada y con esta conseguir la información suficiente que sea representativa para el modelo en general. Esto se aplicó en el proceso de simulación del doblado de tubos y barras por compresión con el propósito de reducir el tiempo que demora la simulación y el gasto computacional.

Para esta simulación la herramienta de simetría es aplicable debido a que las piezas obtenidas al dividir la pieza original con un plano, están compuestas de un mismo material, características geométricas iguales e iguales condiciones de entorno. Además la carga a la que se ve sometida es simétrica, es decir, se presenta el mismo nivel de esfuerzos en ambas geometrías.

Para optimizar el modelo y reducir los tiempos de simulación se modifica la geometría de las piezas utilizadas, con el fin de omitir secciones que no son de interés y para los cuales el programa va a establecer un mallado y posterior solución, se utiliza la configuración presentada en la figura 13, donde se utiliza la técnica de simetría para reducir el tamaño del modelo, aprovechando la regularidad geométrica de la pieza a simular, de este modo el nivel de esfuerzos que presenta el modelo respecto a un plano simétrico será la mitad del esfuerzo que realmente logra deformar la barra.

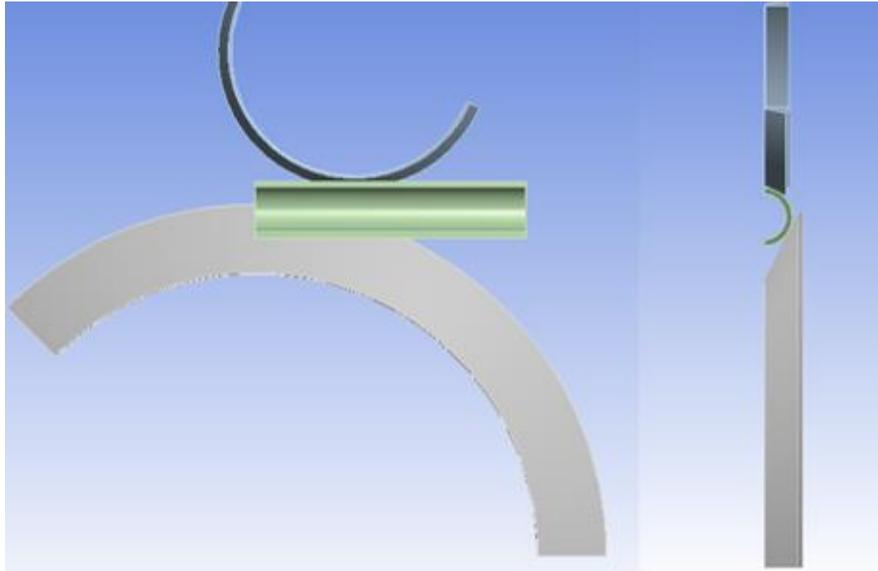


Figura 13. Geometría simplificada a simular.

#### 4.4. Elementos finitos utilizados y condiciones de mallado

El tipo de elementos finitos utilizados se escogieron teniendo en cuenta dos zonas de interés; la geometría del tubo o barra a doblar porque es donde están presentes las propiedades mecánicas y geométricas que intervienen en el proceso de doblar y las superficies en contacto entre la barra o tubo a doblar y la matriz de rigidez y el rodillo compresor.

Para la barra o tubo se utilizó un elemento solid 185 que se presenta en la figura 14, es un tipo de elemento que está definido por 8 nodos (M, P, O, N, J, K, I y L) y que cuenta con 3 grados de libertad coincidentes con las tres traslaciones espaciales (SX, SZ y SY), este elemento era el más adecuado para el estudio teniendo en cuenta que se le pueden definir comportamientos de plasticidad y endurecimiento, además presenta una gran capacidad para las grandes deformaciones, hiperelasticidad y deflexiones. Este elemento presenta una característica interesante, ya que si se quiere disminuir el error de shearlocking ocasionado por valores de esfuerzos elevados en el elemento, es capaz de crear grados de libertad ficticios.

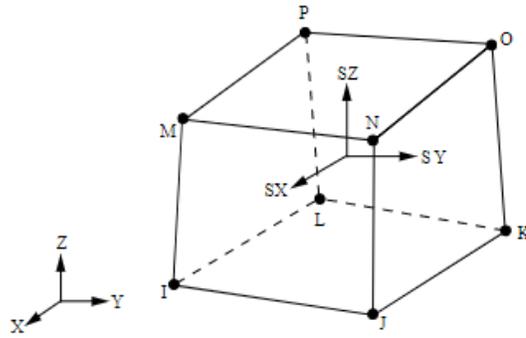


Figura 14. Elemento solid 185 utilizado en la malla del tubo y la barra. [20]

Las condiciones de frontera se definen con ayuda de los elementos Conta 174 y Targe 170, en la zona de contactos se utilizaron tipo superficie-superficie, entre los que se encuentran elementos Conta 174 como se muestra en la figura 15, un elemento definido por 8 nodos y se utiliza para caracterizar la superficie que es flexible, es decir, que se puede deformar, para esta simulación se utiliza un contacto basa en pares, es decir, cada nodo de la superficie tiene una pareja.

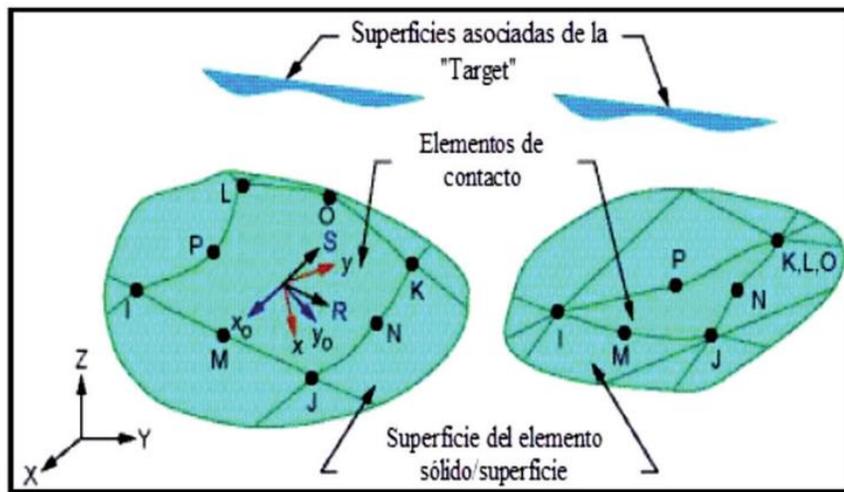


Figura 15. Elemento Conta 174 utilizado para definir las conficiones de frontera. [20]

Por lo cual se utiliza el elemento objetivo Targe 170 como se muestra en al figura 16, se caracteriza la superficie objetivo o superficie rígida. Estos dos elementos se caracterizan porque van en pares

relacionados uno con el otro y permiten establecer características como fricción, traslaciones, rotaciones y penetración entre las superficies.

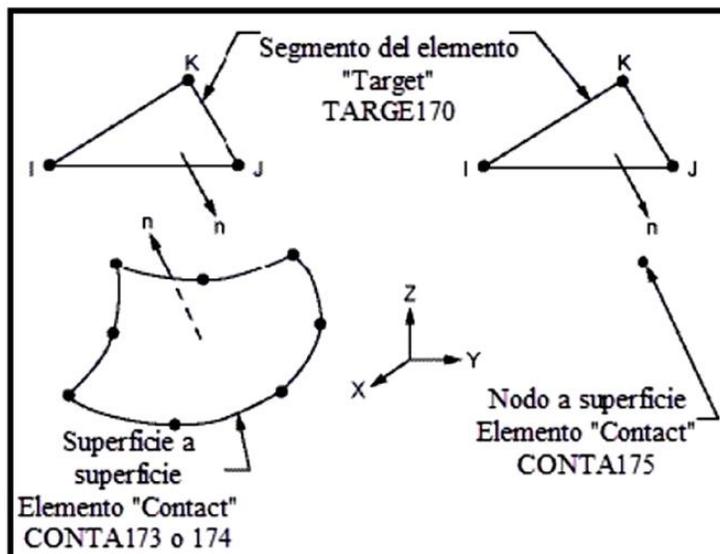


Figura 16. Segmento del elemento Targe 170. [20]

La condición de frontera se caracteriza por eliminar la fricción entre las superficies, debido a la configuración que presenta el proceso de blado por compresión.

En el mallado se priorizan el uso de elementos Quad ideales a para mallar alrededor de superficies curvas conformado por 3 capas, entre más capas mejor calidad en el mallado pero mayor gasto computacional, se utiliza un método de barrido para la barra o tubo, con lo cual se logra una complejidad baja para la solución en el algoritmo a resolver, en las superficies en contacto de utiliza un malla de cara para garantizar el tamaño de elemento obtenido en la convergencia.

## 4.5. Determinación del tamaño de los elementos

Teniendo en cuenta que el análisis del modelamiento depende en gran medida de la creación de la malla, se realiza la selección de esta mediante el método de convergencia, donde se varía el tamaño del elemento que compone la malla hasta lograr resultados que se asemejen en magnitud a los resultados calculados analíticamente, teniendo en cuenta que entre más pequeño sea el tamaño del elemento más fina se hace la malla y el gasto computacional es mayor, por lo cual se busca un punto de equilibrio donde la variación del resultado al disminuir el tamaño de los elementos sea despreciable en comparación al aumento de tiempo de simulación.

Esta validación se realiza en la barra, teniendo en cuenta que presenta elementos hexagonales debido a que poseen un mayor ajuste o representatividad de la geometría que se analiza, de igual manera estos elementos poseen la capacidad de deformarse en todas las direcciones, es decir, su grado de libertad es alto, en los demás elementos no se hace necesaria la validación, ya que en el proceso de

simulación actúan como elementos rígidos indeformables y no tendría lógica validar los esfuerzos que se presentan.

Tamaño de elemento (m)	Variación (%)
15E-3	170
10E-3	102
7,5E-3	59
5E-3	36
1E-3	5,2
0,75E-3	4,7

Tabla 4. Variación en la convergencia de la malla.

En la tabla 4, se presentan los tamaños de elementos para los cuales se realizó el método de convergencia, estableciendo que el tamaño apropiado para realizar la simulación era de 0,75E-3 m, teniendo en cuenta la pequeña variación que se daba con el tamaño de elemento siguiente y el gasto computacional al que se incurria al realizar un modelo sencillo.

## 4.6. Condiciones de frontera

Una dobladora se diseña de tal manera que el material con el que está fabricada soporte el nivel de esfuerzos necesarios para deformar una barra o tubo si que se deforme la dobladora, en el modelo a simular se trata las piezas que conforman la dobladora como elementos rígidos de modo que no se presenten deformaciones en estas, y la barra o tubo se le da un comportamiento de flexible para que se presenten las deformaciones.

Al realizar una simulación se intenta que las condiciones en las que se lleva a cabo sean cercanas a las condiciones reales, la dobladora de barras y tubos que se encuentra en el laboratorio cuenta con un rodamiento en el rodillo compresor, esto disminuye en gran proporción la fricción que se puede presentar entre las superficies, para el caso de la simulación se configuró la superficie de modo que no existirá la fricción entre estas.

## 4.7. Configuración de simulación

Para de determinar el torque de doblez por compresión de un tubo o barra por medio del modelamiento fue necesario establecer tres tipos de configuraciones; material, geometría y configuración de software.

### 4.7.1. Materiales

En el material se estableció el comportamiento en la zona elástica y plástica con las propiedades presentada en la tabla 5, dónde se empleó un modelo bilineal para definir la zona plástica por medio del módulo tangente, este material se utilizó para realizar la comparación con los datos experimentales obtenidos en el laboratorio. En la comparación del valor del torque de doblez por compresión en la barra, se utilizó un acero 4140.

**Acero AISI 1008 HR**

<b>Propiedades</b>	
Sy (MPa)	190
Sut (MPa)	330
Módulo Young (GPa)	190
Módulo tangente (MPa)	1100
Poisson	0,29

Tabla 5. Propiedades mecánicas del material utilizado para la comparación.

Para simulaciones dónde se estimó el torque de doblez por compresión para distintas geometrías se utilizó un AISI 1020 HR, presentado en la tabla 6.

<b>Acero AISI 1020 HR</b>	
<b>Propiedades</b>	
Sy (MPa)	240
Sut (MPa)	430
Módulo Young (GPa)	190
Módulo tangente (MPa)	1230
Poisson	0,29

Tabla 6. Material utilizado para estimar el torque en diferentes geometrías.

Por último se presenta el material utilizado en la simulación de la barra de acero 4140 en la tabla 7.

<b>Acero AISI 4140</b>	
<b>Propiedades</b>	
Sy (MPa)	660
Sut (MPa)	740
Módulo Young (GPa)	190
Módulo tangente (MPa)	1347
Poisson	0,29

Tabla 7. material utilizado para estimar el torque en barra de 1 pulgada.

#### 4.7.2. Geometría

La geometría utilizada en el modelamiento se presenta en la figura 13, la cual va a estar definida por el diámetro del tubo, su espesor de pared y el radio de doblez, que corresponde al diámetro de la matriz de doblado. Para la simulación y comparación con los datos obtenidos en el laboratorio se utilizó la geometría del tubo presentada en la tabla 8.

<b>Geometría</b>	
Diámetro (mm)	9,605

Espesor (mm)	2,7
--------------	-----

Tabla 8. Geometría del tubo simulado.

Para determinar el comportamiento del torque de doblez a medida que se varía la geometría, el diámetro externo del tubo permanece constante de 9,605 mm y si se varía el espesor de pared, partiendo desde tubos con espesores de un milímetro, luego pasando por tubos con espesores comerciales como los SCH 10, 40 y 80S, hasta llegar a una barra maciza.

### 4.7.3. Configuración del software

La simulación se lleva a cabo por medio de la herramienta análisis estructural, donde es necesario establecer la geometría, material, configuración y ajuste del modelo y que resultados se desea obtener, como se muestra en la figura 17.

Se definen los parámetros de proceso que permiten establecer el calculo del torque de doblez, entre los que se encuentran las sujeciones de soporte fijo que establecen los puntos de fijación y no permiten el movimiento de la pieza, para el modelo se utiliza una fijación de la matriz de doblado y del tubo el punto C, como se puede observar en la figura 18. También se utiliza una restricción de desplazamiento en el tubo que no permite el movimiento de este en el eje z (punto B) de modo que el comportamiento del doblado simule el comportamiento real y no se obtenga un desplazamiento en esta dirección.

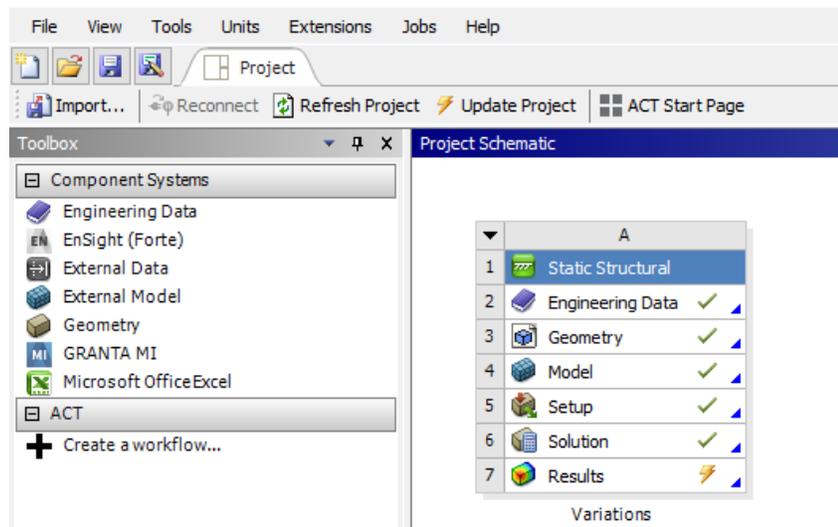


Figura 17. Configuración del análisis estructural.

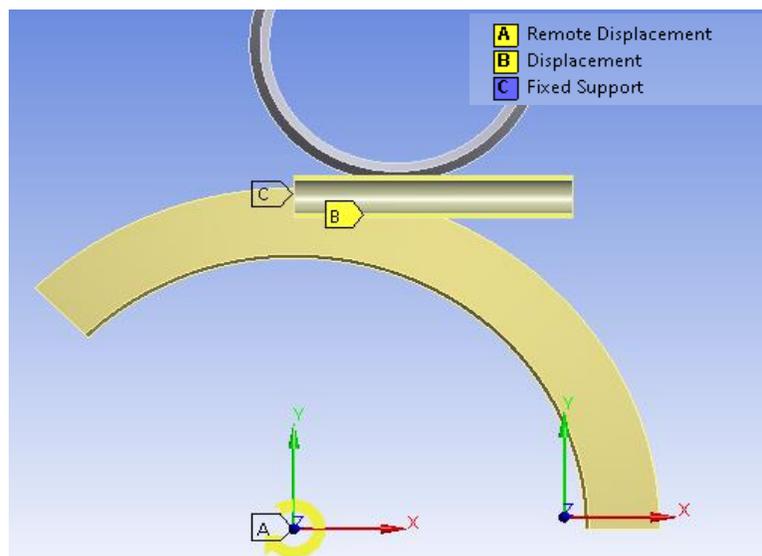


Figura 18. Sujeciones y restricciones de movimiento en el modelo.

Por último, se define el desplazamiento remoto, un parámetro importante porque será el encargado de dar al rodillo compresor la trayectoria tangencial a la matriz de doblado para producir el doblez del tubo o barra, además se utiliza para medir indirectamente el torque de doblez, ya que se mide la reacción que este soporta el rodillo al realizar el doblez. Así mismo, esta configuración también es utilizada para determinar el springback, cuando el rodillo llega al ángulo final de doblado se configura para que se devuelva hasta cierto punto, de modo que la recuperación elástica se evidenciará como una reacción sobre el rodillo hasta un ángulo determinado antes de llegar a su posición final.

El proceso de doblado se lleva a cabo 3 steps o pasos, en el primero que consta de 0,5 segundos se realiza la estabilización que es el rodillo compresor hasta que esté en contacto con la barra o tubo a doblar, en el segundo steps se produce el avance máximo del rodillo compresor desde los  $0^\circ$  hasta los  $12^\circ$  de modo que se garantice que se produce deformación en la barra, por último el rodillo se devuelve  $4^\circ$  con el fin de determinar hasta que punto la barra o tubo le ejerce una reacción al rodillo y así se determina el springback.

#### 4.7.4. Curva de aprendizaje y generalidades de la simulación realizada

Las primeras simulaciones realizadas estaban compuestas por geometrías completas de la matriz de doblado, barra y rodillo compresor y de elementos mucho más grandes que los utilizados al final, el sistema se resolvía en aproximadamente 15-20 minutos, a medida que se fue realizando el refinamiento de mallas el tiempo de simulación fue aumentando, por lo cual se modificó la geometría general del sistema, utilizando solo las partes útiles que permitieran el doblado y una simetría que dividía el sistema en dos partes iguales que ahorra tiempo computacional, de este modo se llegó a un punto que las simulaciones tardaban de 60-70 minutos con resultados representativos del doblado de tubos y barras por compresión.

Para el caso de la barra maciza de 1 pulgada de acero 4140, fue necesario aumentar el tamaño de elementos de la malla, teniendo en cuenta que la geometría de la barra era 3 veces mayor que la de los elementos previamente superado, por lo cual el gasto computacional era elevado, por lo cual se aumentó el tamaño de malla y tiempo de simulación fue aproximadamente 210 y 240 minutos.

---



# Capítulo 5. Aplicación y resultados

---

Con el objetivo de realizar la comparación entre el método experimental, analítico y de modelado se establecen las geometrías y propiedades mecánicas necesarias para realizar el cálculo del torque de doblez por compresión, las cuales están sujetas a la materia prima con la que se cuenta en las instalaciones de laboratorios de la institución.

## 5.1. Plan de ensayos

Se utiliza la máquina dobladora de sección circular de tubos y barras para determinar el torque de doblez de manera experimental para un tubo AISI 1008 HR, además de este valor se puede establecer la ovalidad que presenta un tubo de 9,605 mm y un espesor de 2,7 mm, otro valor que es posible establecer conociendo la configuración de la máquina es el springback del tubo, la intención era realizar este procedimiento para diversas geometrías y materiales, debido a los problemas actuales de salud pública que afectan el mundo, no fue posible acceder a las instalaciones de la Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito para realizar la toma de datos experimentales que permitieran realizar un análisis más enriquecedor en el tema de doblez de tubos y barras por compresión, esto acompañado del corto tiempo en disponibilidad para llevar a cabo la investigación fueron motivo de restricciones.

## 5.2. Ensayos de laboratorio

Los datos experimentales son tomados por medio de un sensor de torque con el que cuenta el laboratorio como se muestra en la figura 19 y gracias a la configuración que presenta con la máquina dobladora es posible calcular la distancia que recorre el eje del tubo en la regeneración y con esto se puede obtener el ángulo de Springback.



Figura 19. Configuración de máquina dobladora y sensor de torque.

### 5.2.1 Resultado de ensayo de laboratorio

El torque de doblez para un tubo de 9,605 mm y un espesor de 2,7 mm se presenta en la figura 20, un valor de 27 Nm, teniendo en cuenta que se toma el valor máximo que garantiza la deformación en la barra, en este punto permanece constante el toque de doblez por compresión, la deformación se produce en un ángulo aproximado de 3,59°, de igual manera se presenta el valor obtenido por la simulación con un valor de 29,34 Nm.

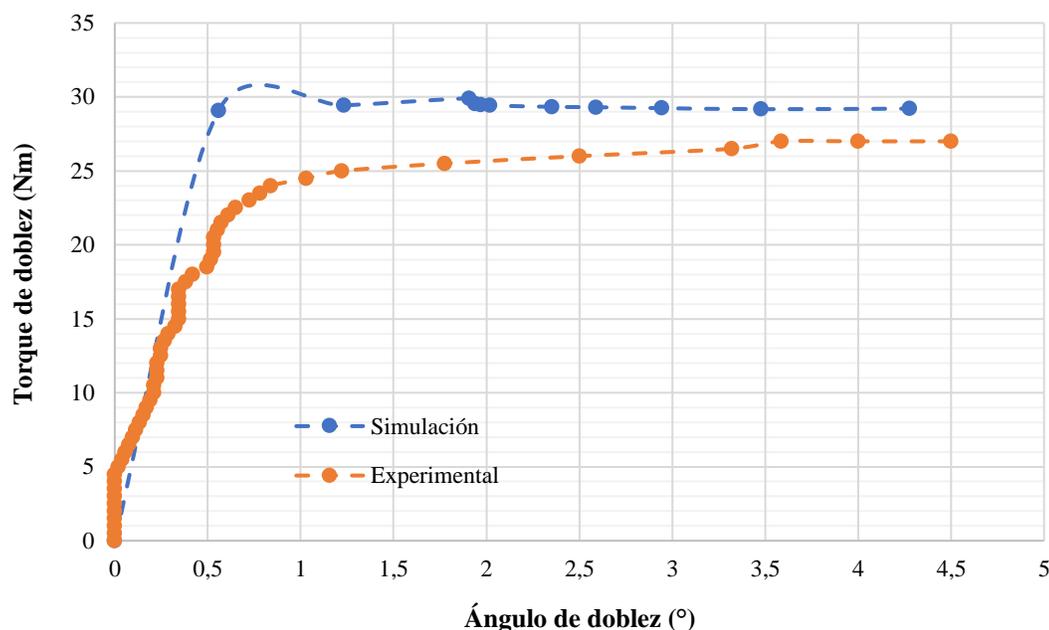


Figura 20. Torque de doblez experimental para tubo de 9,605mm y espesor 2,7mm.

### 5.3. Simulaciones y resultados

El torque de doblez es posible estimarlo de manera indirecta, ya que lo que se mide es la reacción en el rodillo de compresión ejercida por el tubo o barra cuando se está doblando como se muestra en la figura 21, esta curva es característica del proceso de doblado, también se presenta en el doblado de chapas, dónde presenta un crecimiento del torque lineal hasta alcanzar un máximo, en este punto se estima el torque de doblez, ya que es necesario garantizar la deformación en la barra.

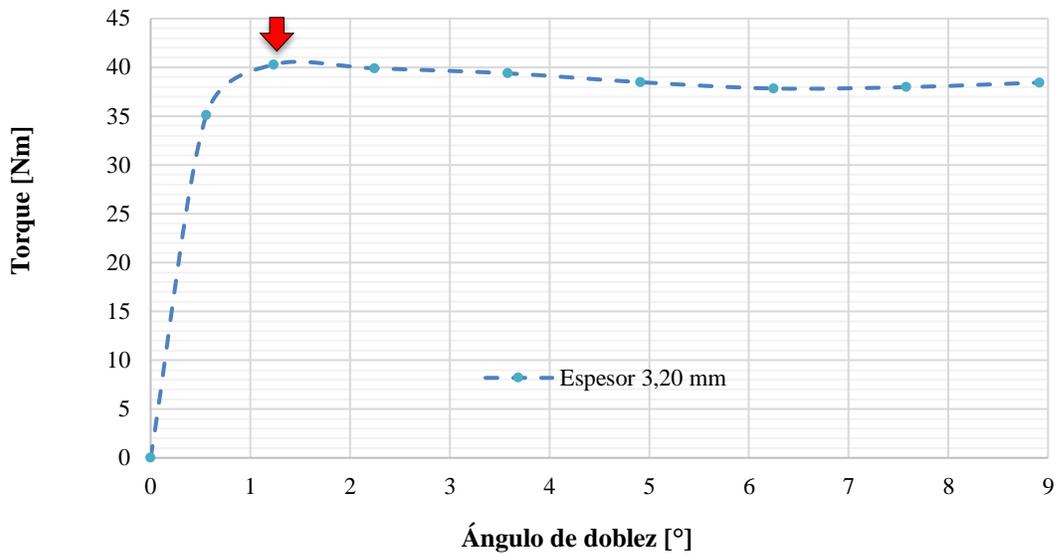


Figura 21. Punto de estimación del torque de doblez.

Los resultados de torque de doblez por compresión que se obtienen por la simulación, son validados por medio del modelo analítico, dónde se introducen las mismas variables utilizadas y se obtienen resultados cercanos, tanto en valor como en tendencia como se muestra en la figura 22.

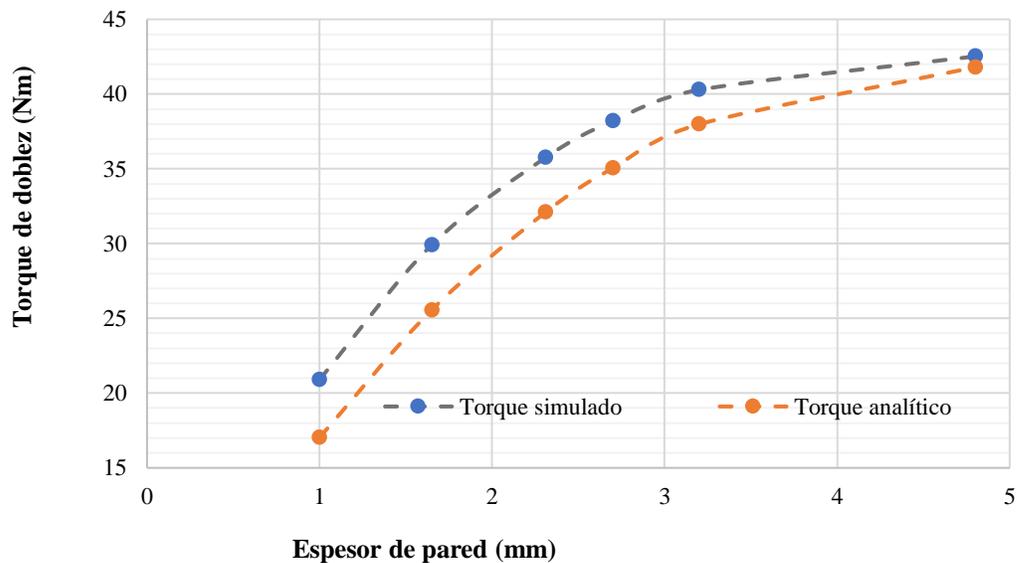


Figura 22. Tendencia del torque de doblez simulado y analítico.

Uno de los parámetros importantes en el doblez de tubos y barras es el radio de doblez o el radio de la matriz de doblado, del cual se puede observar que presenta un comportamiento inverso respecto al torque de doblez, a medida que este aumenta el torque de doblez disminuye, como se muestra en la figura 23.

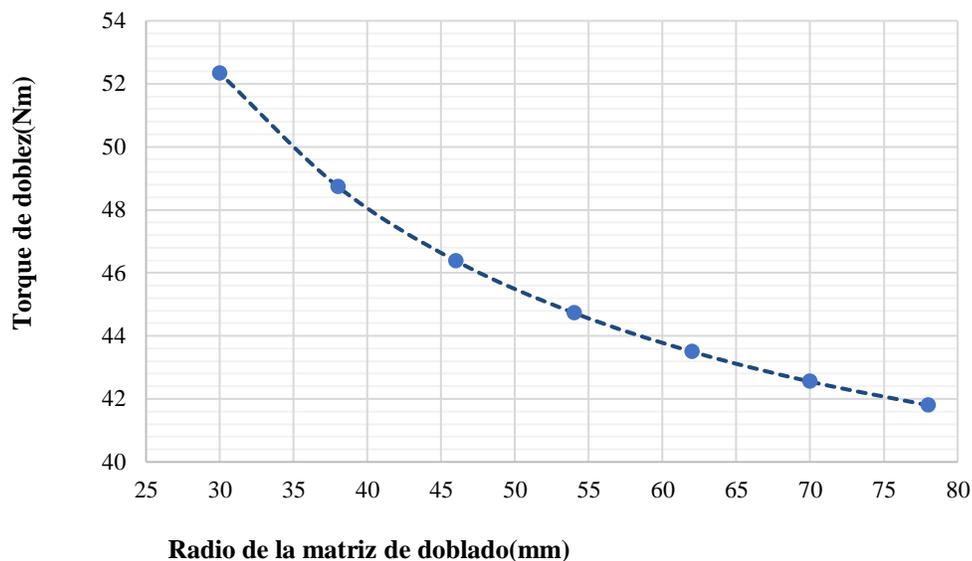


Figura 23. Torque de doblez en función del radio de doblez.

Teniendo en cuenta que los modelos de doblado se basan en una teoría elasto-plástica, lo primero que se quiso observar fue la influencia de la zona elástica y la zona plástica en el torque de doblez por compresión, la zona elástica está definida por el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia, los metales de bajo carbono como el utilizado para el estudio, se caracterizan por tener un comportamiento en la zona elástica similar porque el módulo de elasticidad no varía, es decir que la que el comportamiento en esta zona solo está determinado por la variación del esfuerzo de fluencia, por lo cual se realizaron simulaciones para distintos valores de esfuerzos de fluencia como se muestra en la figura 24, de esta misma se puede observa que con una variación del 10% en el esfuerzo de fluencia, el torque de doblez por compresión varía en un 4,41% aproximadamente.

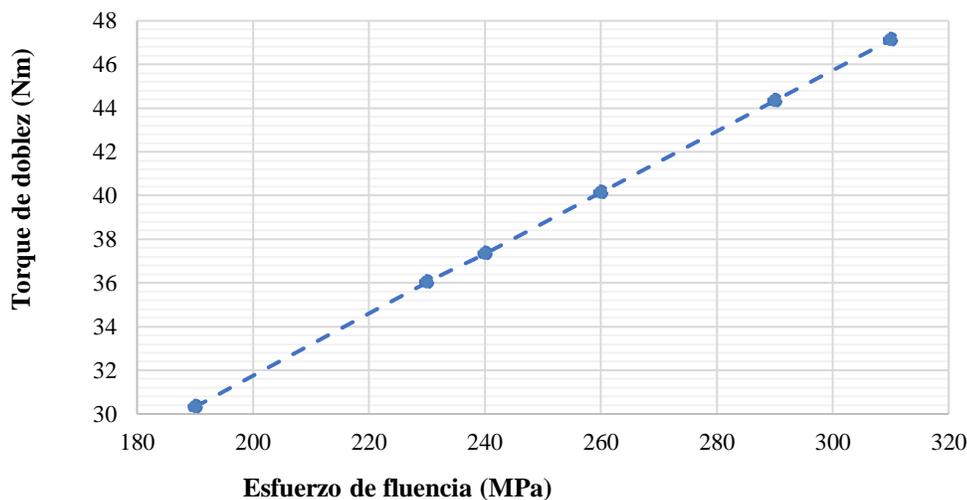


Figura 24. Torque de doblez por compresión en función del esfuerzo de fluencia.

El siguiente punto de interés es la zona plástica, la cual se encuentra definido por el módulo tangente, para obtener la variación del torque de doblez en función del módulo tangente, se establece una elástica fija y se varía la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la zona plástica, pasando de valores de aceros de bajo carbono hasta un acero como el estructural como se muestra en la figura 25, también se puede observar que con una variación del 10% del valor de módulo tangente, el torque de doblez por compresión varía en un 0,54%.

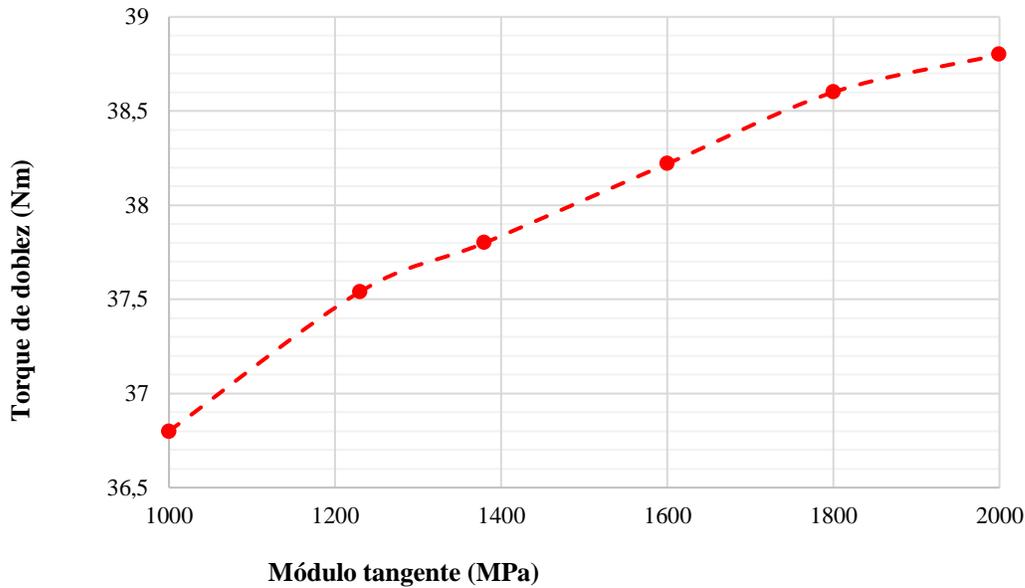


Figura 25. Torque de doblez por compresión en función del módulo tangente.

Al analizar el comportamiento del torque de doblez por compresión con la variación de ambas zonas se puede observar que aunque al aumentar los valores de esfuerzo de fluencia y módulo tangente el torque de doblez por compresión aumentaba, la influencia de la zona elástica es mucho mayor que la influencia de la zona plástica, teniendo en cuenta que para lograr una variación del 4,41% como en la zona elástica, la zona plástica debería variar en un 81,5% aproximadamente. Este hecho se hace evidente cuando se observa la curva esfuerzo-deformación linealizada, teniendo en cuenta que la pendiente del módulo elástico es mucho mayor que la pendiente del módulo tangente, por lo cual, para lograr pequeñas deformaciones cuando se encuentra en la zona plástica la variación el nivel de esfuerzo es bajo, cosa contrario a lo que ocurre en la zona elástica.

Ya analizado el comportamiento del torque de doblez con la variación de las propiedades del material, se realiza el análisis de este variando la geometría de la pieza a doblar como se muestra en la figura 26. Se configura el diámetro externo fijo y medida que el espesor de pared va aumentando el torque necesario para realizar el doblez por compresión aumenta, siendo el valor más elevado cuando se llega a una barra maciza.

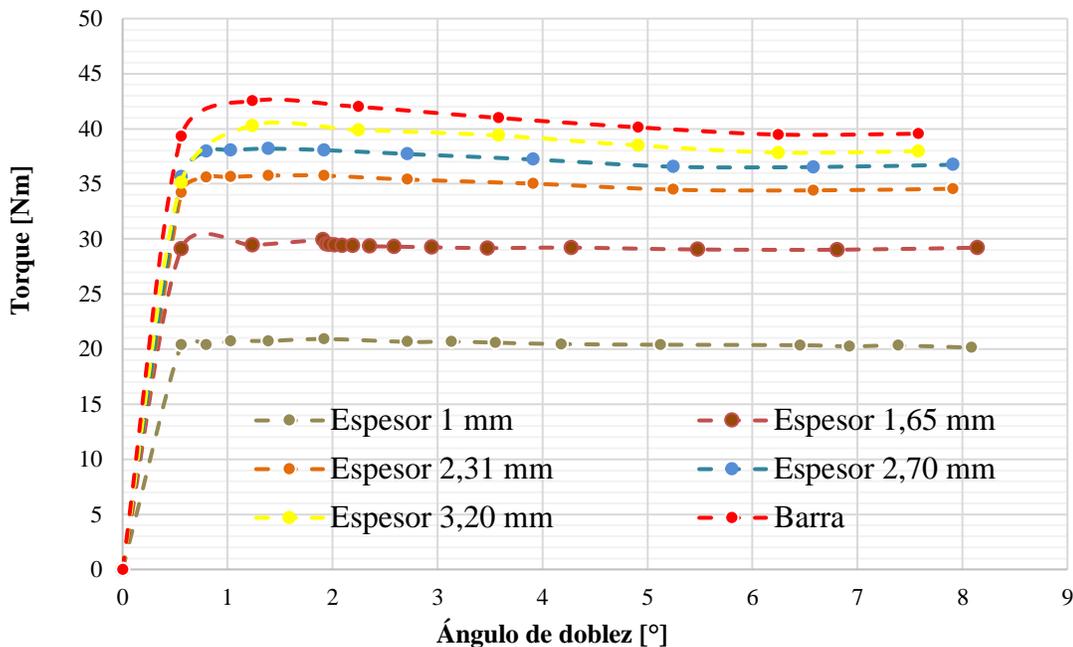


Figura 26. Variación del torque en función del ángulo de doblez para varios espesores.

El torque de doblez por compresión presenta un crecimiento lineal desde que el rodillo compresor entra en contacto con la barra hasta que alcanza la deformación como se muestra en la figura 27, en este punto el torque permanecerá constante para cualquier ángulo de doblez, es evidente que este es característico de cada tubo, aunque se aplique en el mismo material y bajo la misma configuración de la matriz, la geometría de cada tubo varía, en las curvas características del torque se presenta un aumento hasta un ángulo determinado y seguidamente se produce una estabilización, como lo es en el caso del tubo con espesor 1 mm se produce este fenómeno a los  $0,79^\circ$  donde se encuentra el valor máximo del torque de doblez  $20,09\text{Nm}$  y es el que se escoge como torque de doblez para esta geometría, este valor varía a medida que el espesor aumenta, coincidentalmente para la barra y el espesor más grueso simulado ( $3,20\text{ mm}$ ) coincide este máximo en  $1,23^\circ$  variando el valor del torque de doblez de  $40,28\text{Nm}$  a  $42,5$  respectivamente.

Otro de los parámetros importantes en el doblado de tubos y barras es el springback o la recuperación elástica que se presenta en el tubo o barra luego del doblado, este comportamiento también es posible obtener por medio del modelamiento y como se observa en la figura 28, este comportamiento se ve influenciado por distintos factores como lo son propiedades del material, geometría o herramientas utilizadas para doblar, en este caso solo se analizó la influencia de la geometría del tubo o barra y se pudo determinar que a medida que el espesor de pared aumenta, el ángulo de springback aumenta, con un comportamiento lineal.

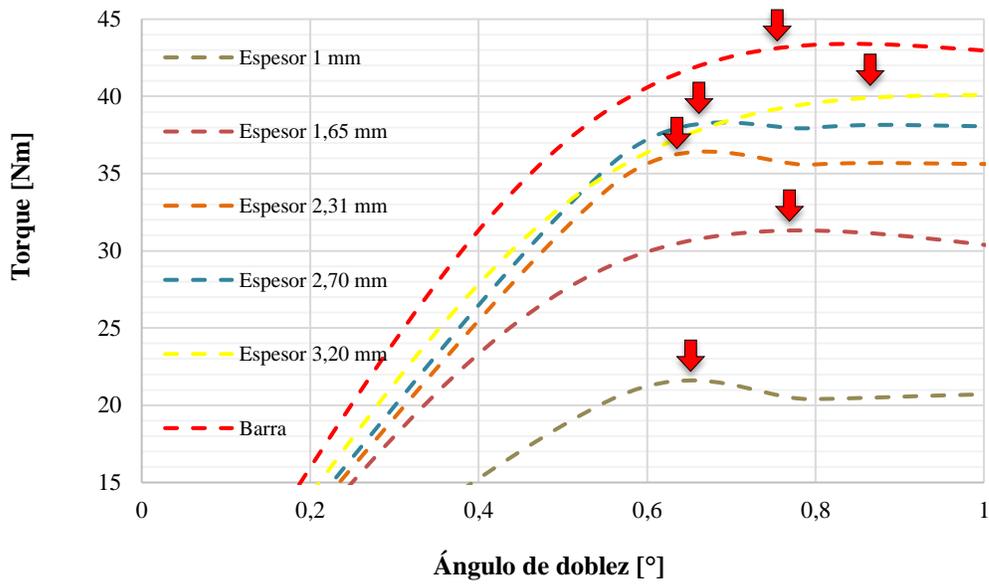


Figura 27. Comportamiento del torque de doblado en determinados ángulos.

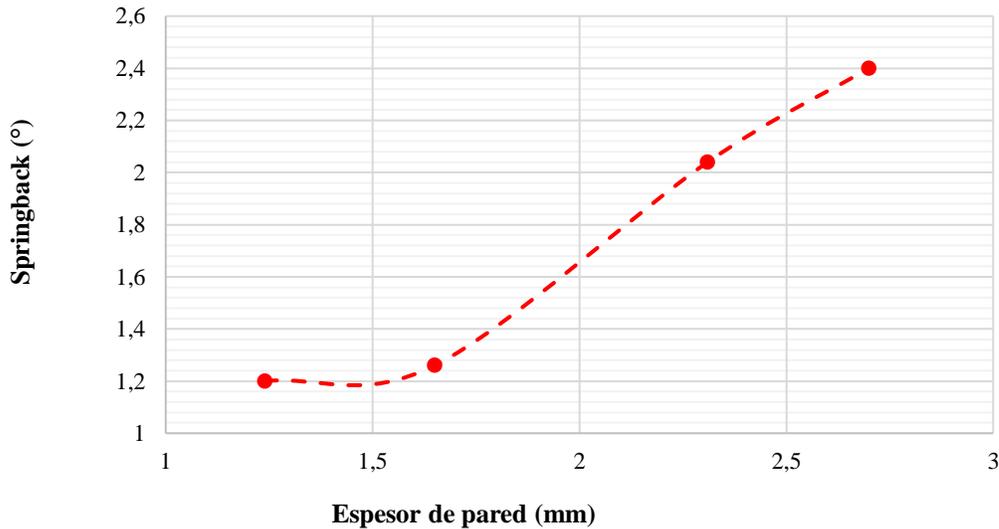


Figura 28. Springback en función de la variación del espesor de pared.

## 5.4. Comparaciones entre métodos de estimación

En la figura 29, se presentan los valores del torque de doblado por compresión por medio de los tres modelos estudiados; analítico, experimental y de modelado, se puede observar que se obtienen valores coherentes y muy cercanos entre sí, con una dispersión 1,18Nm. Por medio del modelado se estimó el torque de doblado por compresión para un tubo de acero AISI 1008 HR de 2,7 mm de espesor con una precisión del 91,3% en función del torque experimental, teniendo en cuenta que si se posee

una capacidad computacional alta se podría realizar un mejor proceso de mallado y así obtener mejores resultados.

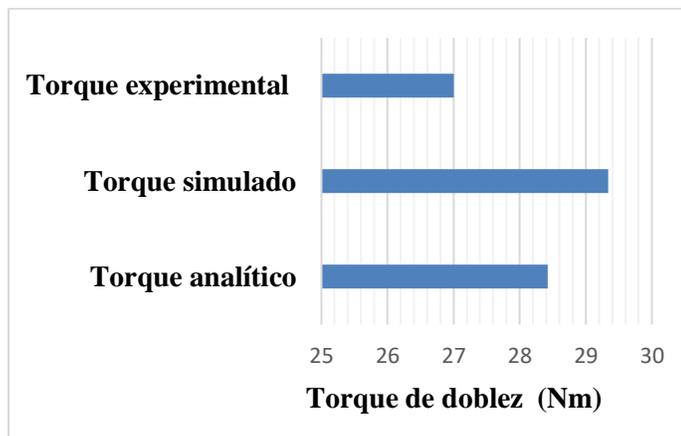


Figura 29. Torque de doblez según los distintos modelos para un espesor de pared de 2,7 mm.

La precisión con la que el torque analítico y el torque simulado se predice, se calcula en función al torque de doblez experimental por medio de la ecuación 9, que es el dato mas exacto que se tiene, estos valores se presenta en la tabla 9.

$$\frac{T_{experimental} - T_{simulado/analítico}}{T_{experimental}} * 100 \quad (9)$$

El caso del error del torque simulado en el tubo se tiene que:

$$\frac{27Nm - 29,34Nm}{27Nm} * 100 = 8,7\%$$

Para el error del torque analítico se tiene que:

$$\frac{27Nm - 28,42Nm}{27Nm} * 100 = 5,3\%$$

Modelo	Error (%)
Simulación	8,7
Analítico	5,3

Tabla 9. Porcentaje de error en función del torque experimental para el tubo.

Seguidamente se realiza la comparación de los valores obtenidos en el torque de doblez por compresión por los tres modelos para una barra maciza de acero 4140 de 25,4 mm de diámetro como se muestra en la figura 30, donde se presenta una dispersión de 160,74 Nm con una precisión del 87,8%. En los datos obtenidos por el modelo para la barra, se debe tener en cuenta que no se realizó con la misma precisión que la simulación para el tubo, teniendo en cuenta que el estudio de donde se obtuvo el valor experimental no presentaba definitivamente el tipo de material de la barra, hecho que afecta directamente el resultado del valor simulado.

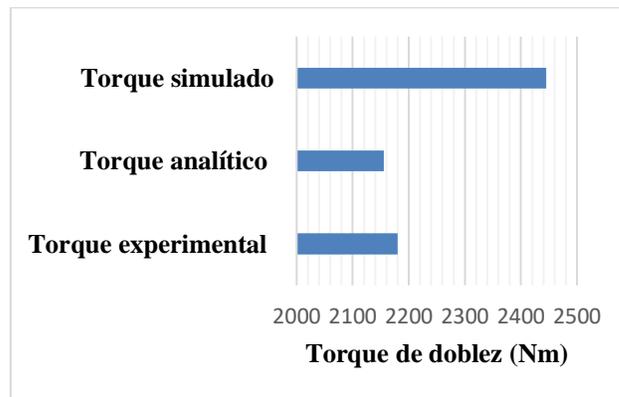


Figura 30. Torque de doblez según los distintos modelos para una barra maciza.

De igual manera que el caso del tubo, para la barra el cálculo del error se realiza en función del valor experimental, como se presenta en la tabla 10.

Modelo	Error (%)
Simulación	12,1
Analítico	1,13

Tabla 10. Porcentaje de error en función del torque experimental para la barra.

Las comparaciones del torque de doblez en tubos y barras coincidieron en que el valor del modelo es superior al valor analítico, debido que la simulación tiene en cuenta factores que no relevantes en el modelo analítico, una muestra de esto es que dicho modelo no tiene en cuenta la variación del eje neutro a medida que la deformación se va produciendo.

---



# Capítulo 6. Conclusiones

---

- El método de elementos finitos utilizado en el software ANSYS, permitió cuantificar el valor del torque de doblez por compresión para tubos y barras de distintas dimensiones y materiales, manteniendo la configuración de la maquina dobladora de tubos de sección circular presente en el laboratorio, para un acero AISI 1008 HR de manera coherente respecto al resultado analítico y experimental, donde se presenta una medida de la dispersión de 1,18 Nm, cuando se realiza la comparación de los resultados entre el torque experimental y el torque calculado por modelamiento se tiene un porcentaje de error del 8.7 %, que si se tienen en cuenta un proceso de mallado mas fino podría disminuir.
  - Los métodos que actualmente permiten estimar el torque de doblez de tubos y barras por compresión se pueden agrupar de manera general en tres grupos; analíticos, experimentales y simulados. Se caracterizan por su variedad de variables empleadas en cada uno de los métodos, ya que dependen del enfoque que el investigador quiera darle al estudio, se pudo observar que existe variación de variables entre modelos de validación del torque y aún mas allá entre distintos autores de un mismo grupo.
  - En el torque de doblez por compresión para tubos y barras son diversas las variables o factores que intervienen, en este estudio se pudieron observar mas de 25 factores, entre los que se encuentra la geometría de la barra o tubo, donde el espesor de pared de tubo es uno de los parámetros que influyen de manera directa en la variación del torque de doblez de tubos y barras por compresión, obteniendo mayores valores de torque a medida que se aumenta el espesor. También se pudo evidenciar que el torque de doblez aumenta hasta alcanzar la deformación en la barra o tubo y a partir de este punto permanece constante hasta alcanzar el ángulo de doblez deseado. También las propiedades mecánicas del material como el esfuerzo de fluencia y módulo tangente, donde se observó que la influencia del esfuerzo de fluencia en el torque de doblez de tubos y barras por compresión, es mayor a la influencia que proporciona el módulo tangente.
  - En una simulación el proceso con el cual se realiza el modelado del problema es de suma importancia, teniendo en cuenta que la precisión del resultado dependerá de manera directa, se pudo evidenciar que la desviación estandar de los resultados y el error del torque modelado respecto al torque experimental aumentaron cuando se disminuyó la calidad del refinamiento de la malla, pasando de un error del 8,7% al 12,2%.
  - Para la definición del comportamiento de la plasticidad en las simulaciones, se utilizó un modelo bilineal, se tomaron valores de referencias que no eran muy precisos de otros artículos o bases de datos, por lo cual se recomienda para trabajos futuros realizar un ensayo de tensión de modo que se pueda mejorar el comportamiento bilineal en el material y así obtener resultados mas precisos.
-



# Bibliografía

---

- [1] Doyle. Lawrance, *Proceso de manufactura y materiales para ingenieros*. México D.F.: Diana, 1980, 1007 p.
- [2] G. Vidal, N. Caudillo, M. González, B. Cruz, J. Corona, J. Cháves and A. Jimenénez, “Diseño y evaluación de prototipo para doblar barras de acero de alta resistencia” Sin fecha.
- [3] H. Ortega, J. Luis, P. Blanca, and L. Habana, “Análisis y síntesis de la planeación del proceso de doblado de tubos por arrastre” vol. 34, no. 1, pp. 3–12, 2013.
- [4] P. Flores, “Diseño y construcción de una máquina dobladora de tubos hidráulica con accionamiento automático” 2013.
- [5] Cuadrado. Alvarado, *Análisis numérico del proceso de conformado de tubos por flexión* (Sin fecha).
- [6] H. A. Al-Qureshi, “Elastic-plastic analysis of tube bending,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 39, no. 1, pp. 87–104, 1999.
- [7] F. Stachowicz, “Bending with upsetting of copper tube elbows,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 236–240, 2000.
- [8] N. Arzola, A. Tovar, and A. Gómez, “Rediseño y optimización de una máquina dobladora de barras de acero” vol. 19, no. 2, pp. 7–19, 2007.
- [9] S. Keeler, M. Kimchi, R. Kuziak, R. Kawalla, S. Waengler, and Y. G. Yuqing Weng, Han Dong, “Advanced high-strength steels for automotive industry,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 511, 2014.
- [10] R. Agarwal, “Tube Bending With Axial Pull and Internal Pressure,” 2004.
- [11] A. Ceclan, G. Achima, and F. M. Groze, “Finite element simulation of tubes press bending process” 2007.
- [12] H. Tabane, A. Miyasaka, K. Yamazaki, T. Iwasaki and H. Akada “High-Strength steel tubes for Automobile door Impact beams” 1995.
- [13] J. Dryden, “Bending of inhomogeneous curved bars,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 11–12, pp. 4158–4166, 2007.
- [14] P. Otero, “Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. Universidad Tecnológica de La Habana” 2006.
- [15] G. Anzaldo,(Ed). (Sin fecha). *Introduction to ANSYS Meshing 16.0*. ANSYS, Inc.

- [16] A. Arias, A. Mena, “Diseño y construcción de una máquina hidráulica dobladora de tubería redonda” 2009.
- [17] K. Rosillón, “Diseño de una dobladora de tubo manual de sección circular para el atler de fabricación del I.U.T Antonio José de Sucre” 2014.
- [18] O. Pérez, H, Castillo “Análisis y evaluación del efecto springback en procesos de doblado de lámina de acero” 2019.
- [19] A. Urbano, E. Amaya, T. Cruz, A. Guevara, S. Cepeda (2017). SIC. Bogotá, Colombia.
- [20] A. Vidal, A. Camarillo and R. Lesso. “Análisis estructural por MEF de bipedestador para la marcha asistida” 2013.