

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Doblado de tubos y pletinas: Adaptación del proceso
a una práctica docente.

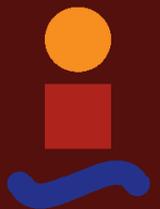
Autor: Santiago Ambrona Reguero

Tutores: Marcos Carlos Borrego Puche

José Andrés López Fernández

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Doblado de tubos y pletinas: Adaptación del proceso a una práctica docente.

Autor:

Santiago Ambrona Reguero

Tutores:

Marcos Carlos Borrego Puche

José Andrés López Fernández

Profesor titular

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Proyecto Fin de Carrera: Doblado de tubos y pletinas: Adaptación del proceso a una práctica docente.

Autor: Santiago Ambrona Reguero

Tutor: Marcos Carlos Borrego Puche
José Andrés López Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

Tras un camino de momentos tanto buenos como malos, este pequeño tramo de mi vida ha llegado a su fin. Llegar a una nueva ciudad como es Sevilla, conocer gente maravillosa y única, y vivir experiencias increíbles que me han permitido ya no solo formarme como un futuro ingeniero sino también como persona durante estos años. Es por eso que parte de este camino se lo quiero dedicar a aquellas personas que han visto este camino día a día en estos años.

Primero agradecer a mis tutores Marcos y Andrés por ayudarme en todo momento en la redacción, los ensayos y atenderme a las numerosas dudas que me fueron surgiendo en el transcurso de la realización de este trabajo. También a Manuel, por su gran compañía y ayuda en el laboratorio cuando le necesitaba.

A mis compañeros de la carrera, el grupo “*Sollo Polo*”, por todas esas anécdotas y momentos inolvidables vividos en clase, por esas prácticas “imposibles” hechas a la última hora de entrega, por las comidas en el parque de la Escuela y un sinfín de momentos vividos dentro de las aulas de la ETSI.

A mis amigos de la residencia Armendáriz, mi segunda casa en estos años que vivo en Sevilla, con los que he podido vivir la mayoría de mi estancia y disfrutado cada fiesta y plan como nunca y espero que sean muchos más.

A mi grupo de amigos de Ceuta que, a pesar de la distancia, siempre serán mi segunda familia. Por más reencuentros en vacaciones todos juntos, por más fiestas en verano y tardes en la playa, y por seguir manteniendo el buen rollo que tenemos entre todos.

Por último y más importante, a mi familia. A mis hermanas pequeñas, Gloria y Julia, que espero que en unos años consigan también ser ingenieras y sean las mejores en ello. A mis padres, Santiago y Gloria, por hacer el esfuerzo económico y darme la oportunidad de estudiar fuera de Ceuta, por los consejos diarios, tanto académicos como personales, y por el apoyo diario que me mostráis, porque el resultado de todo esto es gracias a vosotros.

Santiago Ambrona Reguero

Sevilla, 2024

Resumen

El desarrollo de la industria y de nuevas técnicas de fabricación, ha obligado a los futuros ingenieros a comprender de primera mano la teoría y conceptos básicos de cada uno de estos procesos. En nuestra Escuela, se desarrollan numerosas prácticas en los diferentes grados que la componen, combinando una parte teórica, principalmente desarrollada en las aulas, y una parte práctica, realizada en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Por ello, en este trabajo de fin de grado se presenta dos procesos de conformación plástica muy utilizados en la industria, como son el doblado de tubos y el plegado de pletina, con el objetivo de diseñar para los alumnos de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, un guion de prácticas a realizar en los laboratorios de la escuela, donde puedan comprender la teoría y conceptos básicos desarrollados anteriormente.

En primer lugar, se presenta una introducción a los diferentes procesos de fabricación que existen en la industria, entre ellos los procesos de conformación plástica y cómo se comporta una pieza metálica generalmente al ser conformada. En segundo lugar, se procede a presentar el primer proceso de conformación, el doblado de tubos, presentando primero sus aplicaciones industriales y su desarrollo en el último siglo. Después, se presenta los métodos más comunes para doblar tubos, introduciendo aquí el doblado por arrastre rotativo. Tras esto, se describe una teoría que abarca el comportamiento del tubo durante el doblado, los parámetros que influyen en el desarrollo de la operación y los diferentes fallos mecánicos que pueden ocurrir. Llegando a su fin, se presenta la máquina a utilizar para los ensayos con sus diferentes elementos y los pasos a seguir para su montaje. Por último, dentro de este apartado, se procede a plantear diferentes ejercicios para las prácticas a diseñar, siendo este el objetivo a llegar en este trabajo.

En segundo lugar, tratando de la misma forma que el doblado de tubos, se presenta el plegado de pletina, realizando su respectiva introducción, para después presentar su teoría básica y la máquina DISMA TRIS, con la que se realizará la práctica. Finalmente, igual que el anterior proceso, se presentará un guion de prácticas para esta operación de conformado.

Abstract

The development of the industry and new manufacturing techniques requires future engineers to understand firsthand the theory and basic concepts of each of these processes. In our School, numerous practices are carried out in its different degrees, combining a theoretical part, mainly developed in the classrooms, and a practical part, carried out in the laboratories of the Technical School of Engineering.

Therefore, this final degree project presents two widely used plastic forming processes in the industry, namely tube bending and sheet bending, with the aim of designing a practice guide for the students of the Technical School of Engineering in Seville, to be performed in the school laboratories, where they can understand the theory and basic concepts that encompass these processes.

Firstly, an introduction is given to the different manufacturing processes that exist in the industry, including plastic forming processes and how a metal piece generally behaves when being formed. Secondly, the first forming process, tube bending, is presented, first introducing its industrial applications and its development in the last century. Then, the most common methods for tube bending are presented, introducing rotary draw bending here. After that, a theory is described that covers the behavior of the tube during bending, the parameters that influence the development of the operation, and the different mechanical failures that can occur. Coming to an end, the machine to be used for the tests is presented, along with its different components, and the steps to follow for its assembly. Finally, within this section, different exercises are proposed for the design of the practices, which is the objective to be achieved in this work.

Secondly, following a similar approach as tube bending, sheet bending is presented, starting with its respective introduction, followed by the presentation of its basic theory and the DISMA TRIS machine, which will be used for the practice. Finally, just like the previous process, a practice guide will be presented for this forming operation.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
Notación	xx
1 Objetivos	1
2 Introducción a los procesos de deformación plástica	3
2.1 <i>Comportamiento mecánico por deformación plástica</i>	5
3 Doblado de tubos	11
3.1 <i>Introducción al conformado de tubos</i>	11
3.1.1 Historia del doblado de tubos y aplicación a la industria	11
3.1.2 Procesos de conformado de tubos	13
3.2 <i>Doblado de tubos</i>	17
3.2.1 Variantes del proceso de doblado de tubos	17
3.2.2 Teoría del doblado de tubos por arrastre rotativo:	21
3.2.3 Equipo usado en los ensayos	30
3.2.4 Descripción del proceso	37
3.2.5 Diseño de la caja para la limpieza de máquinas	40
3.3 <i>Diseño de las practicas</i>	43
4 Plegado de pletina	47
4.1 <i>Introducción al conformado de pletina:</i>	47
4.1.1 Conformado de pletina:	47
4.1.2 Introducción a los procesos de conformado de pletina	48
4.2 <i>Plegado de pletinas</i>	50
4.2.1 Variantes del proceso del doblado de pletinas	50
4.2.2 Teoría del plegado de pletina	54
4.2.3 Presentación de la máquina DISMA TRIS	67
4.2.4 Puesta a punto de la máquina	68
4.3 <i>Diseño de la práctica</i>	69
5 Conclusiones	73
5.1 <i>Trabajos futuros</i>	73
6 Anexo I: Modelo para práctica de doblado de tubos	77
7 Anexo II: Modelo para práctica de plegado de pletina	84
Bibliografía	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Propiedades de los diferentes métodos de doblado de tubos	21
Tabla 3.2: Matrices disponibles de la máquina dobladora de tubos	31
Tabla 4.1: Tabla de las características de los diferentes métodos de doblado de chapa	54
Tabla 4.2: Tabla de valores del factor ψ	56
Tabla 4.3: Valores del factor λ	57
Tabla 4.4: Valores de λ según el valor de R/T	58
Tabla 4.5: Radios mínimos de doblado para ciertos metales a temperatura ambiente	61
Tabla 4.6: Valor del factor k según el tipo de doblado	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación general de los procesos de deformación o conformado de metales	3
Figura 2.2: Procesos de deformación volumétricas o global	4
Figura 2.3: Procesos de conformado de chapa (deformación local)	5
Figura 2.4: Progreso de una pieza en un ensayo de tracción	6
Figura 2.5: Gráfica esfuerzo – deformación ingenieril en ensayo de tracción en metales	6
Figura 2.6: Gráfica esfuerzo – deformación real en ensayo de tracción en metales.	8
Figura 2.7: Curva esfuerzo contra deformación real trazada en una escala log – log	9
Figura 2.8: Influencia de la temperatura y la velocidad de deformación sobre las curvas esfuerzo – deformación.	10
Figura 3.1: Tuberías de plomo utilizadas en la antigua ciudad de Pompeya (79 d.C)	11
Figura 3.2: Primera dobladora de tubos desarrollada por la empresa PINES (PINES, 2023).	12
Figura 3.3: Primera máquina dobladora CNC de la empresa PINES en 1986. (PINES, 2023).	13
Figura 3.4: Proceso de hidroconformado	14
Figura 3.5: Proceso de extrusión con mandril: a) Extrusión directa; b) Extrusión indirecta	14
Figura 3.6: Proceso de estirado de tubos	15
Figura 3.7: Dos formas de rechazado de tubos: a) De manera externa; b) De manera interna	15
Figura 3.8: Perforado rotativo de tubos o Proceso Mannesmann	16
Figura 3.9: Laminación de tubos: a) Con mandril fijo; b) Con mandril móvil; c) Sin mandril; d) Laminado Pilger con mandril y rodillos de forma	16
Figura 3.10: Fundición centrífuga real	17
Figura 3.11: Proceso de doblado de tubos con diferentes fuerzas aplicadas.	17
Figura 3.12: Doblado con rodillos	18
Figura 3.13: Doblado de tubo a tracción	19
Figura 3.14: Doblado por prensa hidráulica	19
Figura 3.15: Doblado por compresión	20
Figura 3.16: Doblado por arrastre rotativo	20
Figura 3.17: Fuerzas de presión y fricción que actúa en el doblado.	21
Figura 3.18: Esfuerzos, tensiones y deformaciones de un tubo doblado.	22
Figura 3.19: Evolución elástico – plástico del tubo en su sección circular	23
Figura 3.20: Pieza doblada a diferentes radios de curvatura.	25
Figura 3.21: Límites técnicos de la operación de doblado.	25
Figura 3.22: Gráfica de viabilidad de doblado para un tubo de diámetro de 12,6 mm de aluminio 6060	26
Figura 3.23: Formación de arrugas para el caso de: a) Bajos valores de WF , no se produce arrugamiento b) Altos valores de WF , se aprecia varias arrugas.	28
Figura 3.24: Representación de la distancia entre arrugas	28
Figura 3.25: Adelgazamiento a un espesor t_0 y engrosamiento hasta un espesor t_1	29
Figura 3.26: Máquina dobladora de tubos con sus diferentes elementos	31

Figura 3.27: Matrices de doblado o conformado de la máquina dobladora	32
Figura 3.28: Matrices de presión	32
Figura 3.29: Mordaza o abrazadera con diferentes secciones	33
Figura 3.30: Doblado con relleno en tubos de alto <i>WF</i>	35
Figura 3.31: Tipos de mandriles: a) Plug Mandrel v) Form Mandrel c) Single ball d) Multi – ball	35
Figura 3.32: Colocación del mandril: a) Mandril demasiado alejado b) Mandril demasiado adelantado	36
Figura 3.33: Matriz de deslizamiento	36
Figura 3.34: Medición de la sección de las matrices de presión a través de: a) Pie de rey b) Galgas de radio	37
Figura 3.35: Comprobación de la matriz adecuada, mediante la colocación del tubo sobre la sección	37
Figura 3.36: Colocación de las matrices de presión y elementos que lo componen	38
Figura 3.37: Colocación de la matriz de doblado y sus elementos correspondientes	38
Figura 3.38: Vista en planta de la dobladora con sus diferentes elementos colocados	39
Figura 3.39: Introducción de tubo auxiliar para facilitar el doblado de ciertos tubos	40
Figura 3.40: Parte delantera de la caja para la limpieza de la máquina	41
Figura 3.41: Interior de la caja para la limpieza de la máquina	41
Figura 3.42: Piezas de la máquina tras el proceso de limpieza	42
Figura 3.43: Pieza pintada con pintura plateada	42
Figura 3.44: Máquina dobladora de tubos limpiada y pintada	43
Figura 4.1: Conjunto de pletinas apiladas	47
Figura 4.2: Esquema del proceso de laminado	48
Figura 4.3: Proceso de doblado de pletina	49
Figura 4.4: Proceso de doblado al aire	50
Figura 4.5: Doblado de chapa en V	51
Figura 4.6: Métodos de Bottoming	51
Figura 4.7: Doblado en canal y Doblado en U	52
Figura 4.8: Proceso de corrugado	52
Figura 4.9: Proceso de doblado rotativo de chapa	53
Figura 4.10: Doblado en voladizo o doblado de bordes	53
Figura 4.11: a) Doble b) Engargolado c) Rebordeado	54
Figura 4.12: Representación de una pletina doblada	55
Figura 4.13: Radios de las fibras, línea neutra y línea indeformada.	56
Figura 4.14: Gráfica $R/T - \lambda$	58
Figura 4.15: Patrones de distribución de tensiones en el espesor: Elástico (E), plástico primario (P_I) y plástico secundario (P_{II})	59
Figura 4.16: Parámetros de doblado en pletina conformada	60
Figura 4.17: Relación R/T y la reducción de tensión de área r	61
Figura 4.18: Holgura entre la matriz y el dado deslizante (punzón)	63
Figura 4.19: Formación de grietas según la dirección de doblado respecto la dirección de los granos	64
Figura 4.20: Pletina plegada agrietada	64

Figura 4.21: Esquema del suceso de springback en el doblado de chapa	66
Figura 4.22: Máquina doblado de bordes DISMA TRIS	67
Figura 4.23: Colocación del tope de ángulo	69
Figura 4.24: Disposición de los diferentes elementos antes de la operación	69
Figura 4.25: Representación de la sección de una pletina con las zonas de tracción y compresión	71

Notación

mm	Milímetros
MPa	Megapascales
WF	Factor de pared
R	Radio de doblado
t	Espesor de la pared del tubo
T	Espesor de la chapa
D	Diámetro exterior del tubo
LN	Línea neutra
X_{LN}	Desplazamiento de la línea neutra
Θ	Ángulo de doblado
Y	Límite de fluencia
M	Momento flector
u	Ovalidad de la sección
ψ	Variación del espesor
L_w	Distancia entre picos de arrugas
E	Módulo de Young o módulo elástico
e_F	Deformación a fractura
σ	Tensiones
ε	Deformaciones
K	Factor de viabilidad de doblado de tubo
n	Exponente de endurecimiento por deformación
k	Coefficiente de resistencia
TS	Tensión máxima a tracción
L_T	Longitud de la chapa traccionada
L_C	Longitud de la chapa sometida a compresión
λ	Factor de desplazamiento de la línea neutra

1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño de un modelo de prácticas para dos procesos de conformado: el doblado de tubos y el plegado de pletinas. Este objetivo se conseguirá a través de la realización de un estudio pormenorizado de los dos procesos. Este incluye una revisión bibliográfica con recientes investigaciones acerca de los métodos y ensayos realizados para cada uno.

En primer lugar, se realizará una breve introducción a los procesos de formado de metales, donde se incluyen los dos procesos a estudiar en esta memoria, y se comentará el comportamiento mecánico de las piezas metálicas al sufrir deformaciones plásticas.

En segundo lugar, se tratará el primer proceso de esta memoria: el doblado de tubos. Primero se realizará una breve introducción sobre su uso en la industria y evolución histórica. Después, se entenderán los diferentes métodos de doblado de tubos, la teoría que lo abarca, la máquina a utilizar para los ensayos y por último, una explicación del contenido del guion de prácticas diseñado para este método.

En tercer lugar, tratando con la misma estructura que el doblado de tubos, se explicará el plegado de pletina. Abarcando desde su evolución histórica, pasando por los diferentes parámetros que influyen en la operación hasta finalizar con la explicación del modelo de prácticas correspondiente.

Al final de esta memoria, se presentará los dos guiones de prácticas establecidos en base a todo el estudio previamente realizado y concluyendo como resultado final de esta memoria.

2 INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Dentro de la industria, se encuentra una gran variedad de procesos que, utilizando diversos medios y herramientas, permiten obtener piezas con ciertas características y propiedades deseadas.

Se denomina a las operaciones de conformado como procesos que alteran la geometría de la pieza inicial de trabajo a través de varios métodos y pasos. La mayoría de estos procesos se realizan mediante esfuerzos mecánicos, aplicando energía como el calor o una combinación de ambas para alterar la geometría y propiedades del bloque de trabajo como comenta Groover (2007). Este tipo de procesos se pueden dividir en cuatro grupos diferentes:

- **Procesos de moldeo:** El proceso comienza con un líquido o un semifluido a altas temperaturas que se fuerza a que fluya en una cavidad llamada molde, donde se enfría y solidifica, adoptando la forma del molde. Este proceso se conoce comúnmente como fundición para los metales y moldeo para piezas plásticas.
- **Procesos de sinterizado o procesamiento de partículas:** Los materiales iniciales son polvos, que se forman y calientan con la geometría deseada. La técnica común involucra la presión y el sinterizado, donde los polvos se fuerzan hacia una cavidad llamada matriz o dado y se calientan uniendo las partículas individuales.
- **Procesos de deformación:** Proceso donde la pieza inicial es sometida a una serie de fuerzas que deberán exceder la resistencia del material. El material, debe ser capaz de resistir en gran parte estas fuerzas para evitar su fractura.
- **Procesos de remoción de material:** Operaciones que retiran el exceso de material de la pieza de trabajo. Los procesos más importantes son las operaciones de maquina como el torneado, perforado o fresado.

Este trabajo se centra en los procesos de deformación plástica o también conocidos como procesos de conformado de metales. En general, en este tipo de procesos se realizan esfuerzos de tracción o compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, en algunos de estos procesos de formado realizan otras operaciones como el estirado, doblado, o realizan cortes sobre la pieza. Por ello, es necesario clasificar este grupo de procesos en dos subgrupos más específicos:

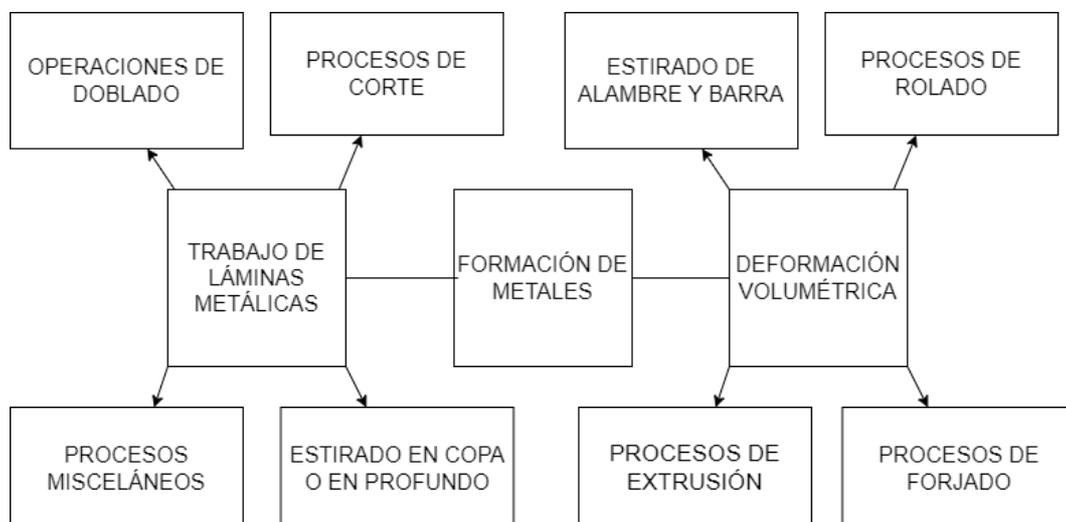


Figura 2.1: Clasificación general de los procesos de deformación o conformado de metales

Procesos de deformación volumétrica:

Son procesos que se caracterizan por la obtención de deformaciones significativas y apreciables sobre la pieza, destacando un gran cambio en la geometría de la pieza y donde la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es de valores muy pequeños. Por lo general, las piezas iniciales de trabajo consisten en barras cilíndricas o rectangulares. Los cuatro principales procesos de deformación volumétrica son: el **laminado**, proceso realizado a compresión donde el espesor de la pieza se ve reducido al pasar por dos rodillos opuestos entre sí; el **forjado**, donde el material es comprimido entre dos troqueles, imprimiendo a la pieza de trabajo la forma del troquel; la **extrusión**, proceso donde el material fluye a través de una abertura para que tome su forma y sección transversal; y el **estirado**, que permite reducir el diámetro de piezas como alambres o barras.

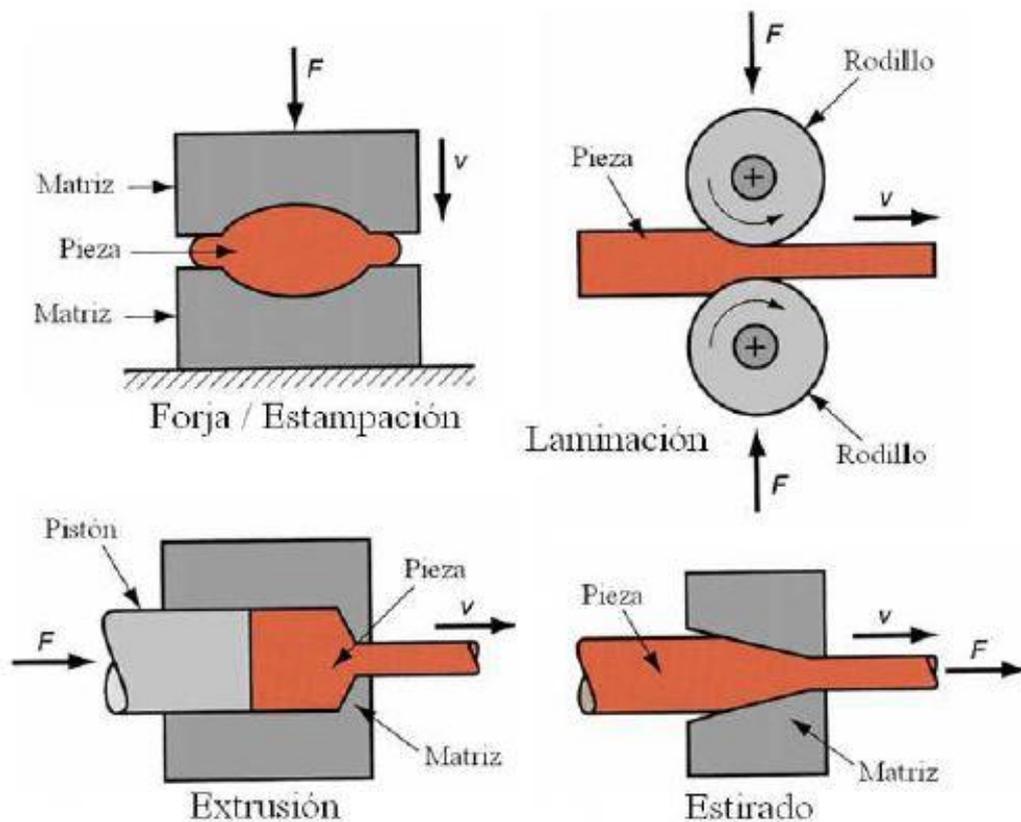


Figura 2.2: Procesos de deformación volumétricas o global

Procesos de trabajo de láminas o chapas metálicas:

Consiste en una serie de operaciones de formado de láminas, tiras o rollos metálicos. A diferencia de los procesos de deformación volumétrica, en este tipo de operaciones la relación entre el área superficial y el volumen del material es alta. Por lo general, estos procesos se realizan en frío y a través de un conjunto de herramientas, donde predominan el punzón (instrumento que aplica la carga necesaria para conformar la pieza) y el troquel (molde donde se apoya la pieza y cuya forma será la que se imprima en ella). Dentro de los procesos con láminas, los más importantes son: el **doblado**, proceso donde se deforma una lámina para que tome cierta curvatura y ángulo; el **estirado**, donde se busca una forma hueca o cóncava de la pieza sujetando la pieza y con un punzón aplicando un empuje sobre ella; y el **corte**, aunque no implica una deformación, el uso de un troquel y punzón permite clasificarlo en el trabajo de chapa.

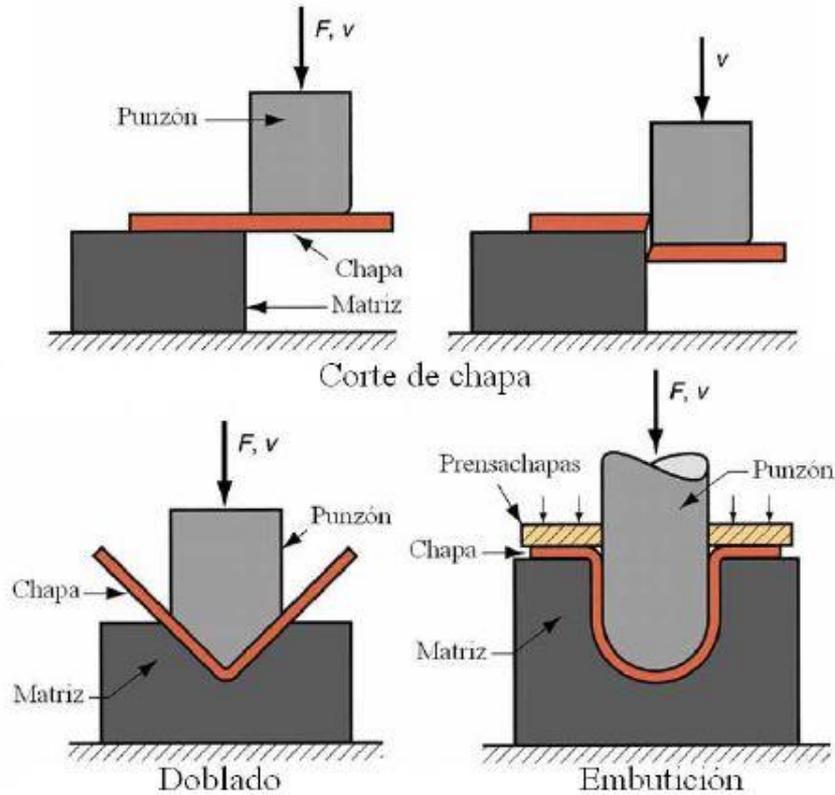


Figura 2.3: Procesos de conformado de chapa (deformación local)

Los procesos que se van a tratar en este trabajo se pueden clasificar en el grupo de trabajo de láminas o chapas, concretamente en las operaciones de doblado. Para el doblado de tubos, no existe una clasificación concreta, ya que no se puede considerar como una lámina metálica pero aun así, las operaciones de doblado son extrapolables para ser trabajadas con diferentes geometrías como los tubos o piezas de sección hueca.

2.1 Comportamiento mecánico por deformación plástica

El comportamiento mecánico de un material se puede traducir como una relación entre el esfuerzo sometido y la deformación que provoca dicho esfuerzo o, dicho con otras palabras, la respuesta de la pieza frente a las cargas a las que está siendo sometida. Las propiedades mecánicas son un factor importante a tener en cuenta y muchas industrias tienen un gran interés en ellas.

Una forma de determinar el comportamiento de la pieza, las diferentes propiedades del material y las relaciones esfuerzo – deformación producidas en la pieza, es a través de un ensayo de tracción, siendo este el ensayo de tensión más usado para estudiar la relación esfuerzo además de otros ensayos conocidos (ensayo de compresión o el ensayo de corte). Dicho ensayo, se realiza aplicando una fuerza gradual creciente y uniaxial sobre una probeta que se irá deformando hasta producir la rotura.

Partiendo de un espécimen de prueba inicial de longitud original L_0 y un área A_0 , se estira hasta formar una estricción (o cuello) y finalmente se fractura. Tanto la carga aplicada a la pieza como su cambio de longitud van siendo registradas a lo largo del ensayo. Con estos datos podemos determinar las relaciones esfuerzo – deformación.

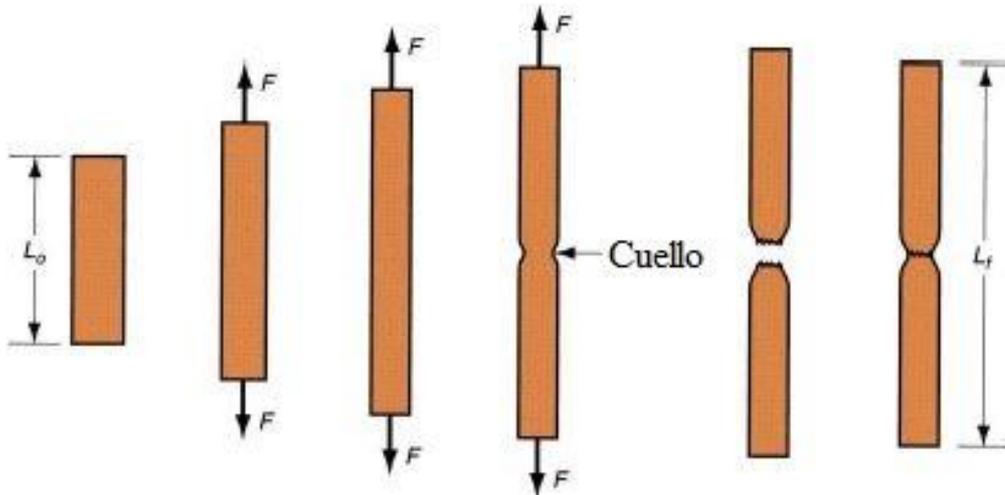


Figura 2.4: Progreso de una pieza en un ensayo de tracción

Existen dos tipos de curvas esfuerzo – deformación: La curva esfuerzo – deformación **ingenieril**, la cual está enfocada en el diseño de piezas y; la curva esfuerzo – deformación **real**, enfocada en la manufactura.

Esfuerzo – deformación ingenieril: Se definen con respecto a la longitud y área originales del espécimen. Su interés en diseño es debido a que permite a los ingenieros conseguir que los esfuerzos experimentados sobre la pieza no cambien significativamente su forma, es decir, que resista los esfuerzos aplicados en el ensayo y los futuros a los que será sometido.

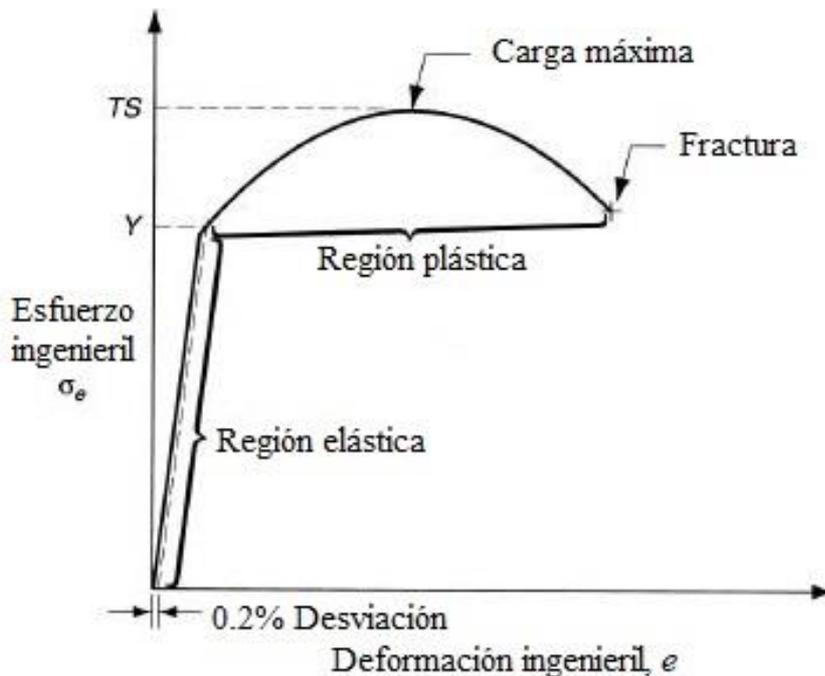


Figura 2.5: Gráfica esfuerzo – deformación ingenieril en ensayo de tracción en metales

Partiendo de la gráfica mostrada en la Figura 2.5, podemos apreciar diferentes componentes. El esfuerzo ingenieril se define en cualquier punto de la curva como la fuerza dividida por el área original:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o} \quad (2.1)$$

Donde σ_e es el esfuerzo ingenieril (MPa), F es la fuerza aplicada a la pieza en el ensayo (N) y A_o es el área original del espécimen antes del ensayo (mm^2).

Por otro lado, la deformación ingenieril se define en cualquier punto como:

$$e = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (2.2)$$

Donde e es la deformación ingenieril (mm/mm); L es la longitud en cualquier punto durante la elongación (mm) y L_o la longitud inicial de la pieza antes del ensayo.

Observando la gráfica de la figura 2.5, es apreciable dos regiones con diferentes comportamientos: La zona elástica y la zona plástica. En la primera zona, la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación es lineal y la pieza, debido a su comportamiento elástico, irá recuperando su longitud inicial tras dejar de aplicarle las cargas en el ensayo. Esta relación lineal se define a través de la Ley de Hooke:

$$\sigma_e = Ee \quad (2.3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material de la pieza (MPa) y es una medida de la rigidez inherente del material.

Al aumentar el esfuerzo aplicado sobre la pieza, se alcanza un punto donde la gráfica empieza a cambiar de pendiente. Este punto se conoce como punto de fluencia Y . Como el inicio de este tramo es difícil de detectar, en muchos casos definimos Y como el esfuerzo que provoca una desviación del 0.2 % con respecto a la línea recta. Este mismo punto marca el inicio de la región plástica, por tanto, a partir de este la ley de Hooke no será de aplicación.

Al incrementar la carga por encima del punto de fluencia, aumenta la elongación de la pieza, pero a una velocidad mucho mayor, provocando un mayor cambio en la pendiente de la curva. A la vez que se elonga, la pieza experimenta una reducción de su área en la sección transversal, pero conservando en todo momento su volumen.

Una vez aplicado la máxima carga, el esfuerzo ingenieril en ese punto recibirá el nombre de esfuerzo o última resistencia al esfuerzo del material que denotaremos como TS , siendo $TS = F_{m\acute{a}x} / A_o$.

A partir de este último punto, la curva comienza a descender y la pieza empieza a experimentar un efecto localizado conocido como formación de cuello. Este efecto provoca que la deformación uniforme pase a concentrarse en una sección localizada de la pieza, haciendo que se estrangule hasta la rotura. La resistencia calculada en el instante anterior a la rotura se conoce como esfuerzo de fractura.

Esfuerzo – deformación real: A diferencia del ingenieril, el valor del esfuerzo real se define al dividir la carga aplicada entre el valor instantáneo del área:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Donde σ es el esfuerzo real (MPa), F la fuerza aplicada (N) y A es el área real (instantánea) (mm^2).

Por otra parte, la deformación real proporciona un valor más realista de la elongación por unidad de longitud del material. Este valor se puede estimar al dividir la elongación total en pequeños incrementos y se suman todos los valores obtenidos.

$$\epsilon = \int_{L_o}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_o} \quad (2.5)$$

Donde L es la longitud instantánea en cualquier momento durante la elongación (mm). Al final del ensayo, el

valor final de la deformación puede calcularse como $L = L_f$.

Si trazamos la curva esfuerzo – deformación real, podremos ver una serie de diferencias con respecto a la curva ingenieril.

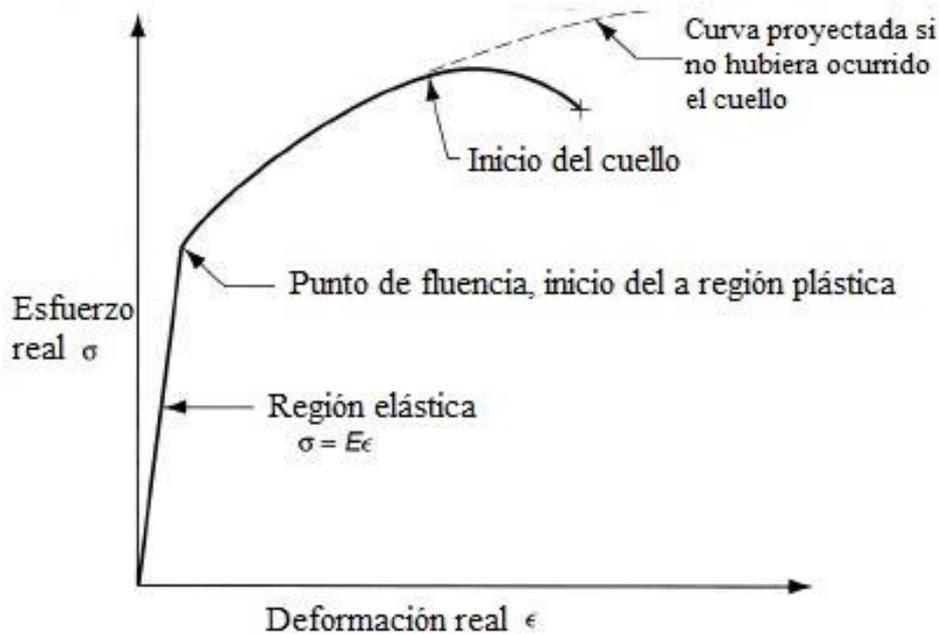


Figura 2.6: Gráfica esfuerzo – deformación real en ensayo de tracción en metales.

A primera vista, en la región elástica el trazo es el mismo que el de la curva ingenieril debido a que los valores de deformación son pequeños y la deformación real es casi igual que la ingenieril. Lo mismo ocurre con los valores de los esfuerzos aplicados, debido a que el área de la sección transversal de las piezas apenas cambia. Por lo que en este caso se puede aplicar la Ley de Hooke.

La diferencia entre las dos curvas se aprecia en la región plástica. Los valores del esfuerzo son más altos en la región plástica ya que para el cálculo se aplican las áreas instantáneas de la sección transversal de la pieza, las mismas que se reducen durante la elongación.

Cuanto más se avanza en la región plástica, los valores de deformación real y deformación ingenieril divergen, pero se puede conseguir una relación entre ambas:

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (2.6)$$

Al igual que la deformación, es posible relacionar el esfuerzo real y el ingenieril:

$$\sigma = \sigma(1 + e) \quad (2.7)$$

El esfuerzo aumenta continuamente en la región plástica hasta que empieza el estrangulamiento. Este fenómeno no se concibe en la curva ingenieril porque en ella se usa un valor erróneo para el cálculo del esfuerzo. Entonces, no es posible descartar que el esfuerzo real también aumenta. Esto quiere decir que el metal es más resistente conforme el esfuerzo aumenta. Esta propiedad se conoce como endurecimiento por deformación.

Esta propiedad es un factor importante en los procesos de manufactura. Si la porción de la curva de esfuerzo contra deformación que representa la región plástica se traza en una escala log-log, el resultado podría ser una relación lineal.

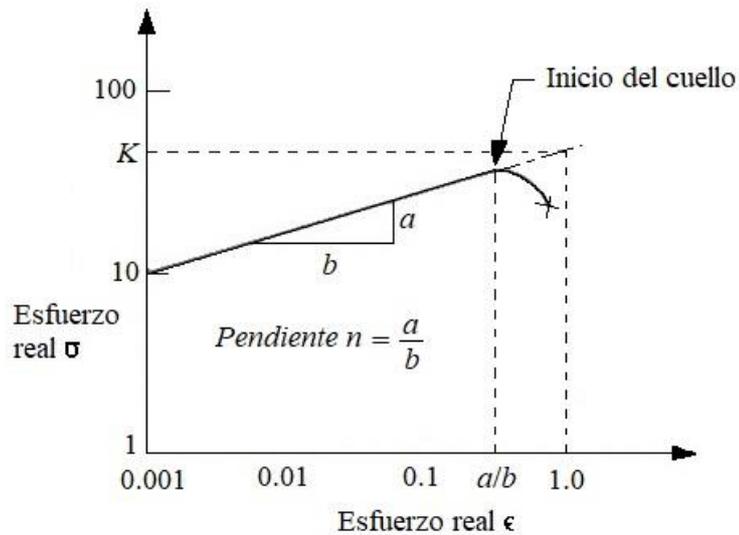


Figura 2.7: Curva esfuerzo contra deformación real trazada en una escala log – log

La relación entre el esfuerzo y la deformación verdaderos en la región plástica se puede definir como:

$$\sigma = Ke^n \quad (2.8)$$

Esta ecuación recibe el nombre de curva de flujo o fluencia y describe el comportamiento de los metales en la región plástica. La constante K se define como coeficiente de resistencia (MPa) e iguala el valor del esfuerzo real cuando éste es igual a 1. El parámetro n se conoce como exponente por deformación y es la pendiente de la línea que aparece en la figura 2.7. Su valor se relaciona directamente con la tendencia del metal a endurecerse por el trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, la curva de esfuerzo – deformación permite conocer una serie de características y parámetros del material. Entre los más destacados y a tener en cuenta en cualquier proceso de formado son:

Límite elástico: Definido como Y , es la tensión máxima que puede soportar la pieza sin sufrir deformaciones plásticas o permanentes. Dicho valor, delimita la zona elástica y plástica de la gráfica tensión - deformación.

Ductilidad: Propiedad que mide la capacidad del material de soportar grandes deformaciones plásticas hasta la rotura final.

$$A = 100 \cdot \frac{(L_F - L_o)}{L_o} \quad (2.9)$$

Donde L_F y L_o corresponden a las longitudes final e inicial de la pieza, respectivamente.

Rigidez: Cualidad por la cual un material no sufre deformaciones.

Resiliencia: Mide la capacidad del material de absorber energía cuando se deforma elásticamente y tras la retirada de la carga, la absorción y almacenamiento de dicha energía. El módulo de resiliencia, R , se define como el área bajo la porción elástica de la curva esfuerzo – deformación. Su cálculo se corresponde con la siguiente expresión.

$$R = \frac{1}{2} \left(Y^2 / E \right) \quad (2.10)$$

Tenacidad: Resistencia que opone un cuerpo a romperse por impacto. Es la capacidad para absorber golpes o

caídas sin producirse la rotura. El módulo de tenacidad a tracción T , corresponde con el área bajo la curva de esfuerzo – deformación completa (elástica y plástica) hasta la fractura. Por lo general, los materiales son tenaces debido a su amplia zona plástica, aun teniendo baja resiliencia. En el caso de materiales cerámicos, aun presentando una alta resiliencia, su tenacidad es baja debido a que su zona plástica es muy estrecha.

Para materiales dúctiles, se puede expresar el valor de T como:

$$T \approx Y \cdot e_F + \frac{1}{2}(Y - S_{LE}) = \frac{1}{2}(Y + TS) \cdot e_F \approx TS \cdot e_F \quad (2.11)$$

Donde e_F es el valor de la deformación a fractura del material,

Dureza: Resistencia a la penetración por fuerza o deformación plástica localizada en un punto. Existen varios ensayos para determinar la dureza de un metal, como los ensayos Vickers, Rockwell o Brinell.

Influencia de la temperatura y de la velocidad de deformación:

Muchas de las propiedades anteriormente mencionadas pueden verse afectadas debido a la variación de ciertos parámetros de la operación como son la temperatura y la velocidad de deformación.

Un aumento de la temperatura provoca una disminución del módulo de Young en materiales metálicos. Del mismo modo, el límite elástico y la resistencia máxima a la tracción disminuyen al aumentarla. En cambio, la ductilidad se comporta de manera opuesta y aumenta con un ascenso de la temperatura. Se podría decir que, debido al aumento de la temperatura, el material se vuelve menos rígido, más blando y por lo general, el material se hace más dúctil.

La influencia de la temperatura puede ser tal que, para valores de temperatura próximos o superiores a 0,3 – 0,4 veces la temperatura de fusión del material expresada en kelvines, el comportamiento puede verse afectado grandemente y experimentar el fenómeno de *termofluencia*, donde el material afectado ve aumentado su deformación sin aumento del esfuerzo aplicado.

Por otra parte, la velocidad de deformación al que se somete la pieza también influye significativamente sobre el comportamiento mecánico. Un aumento de la velocidad de deformación tiene sobre la curva esfuerzo – deformación un efecto contrario que el aumento de la temperatura, es decir, el material se vuelve más duro y menos dúctil. Si el ritmo de deformación alcanza valores muy elevados, un material típicamente dúctil para ritmos de deformación elevados mucho menores de los que puede llegar a comportarse frágilmente.

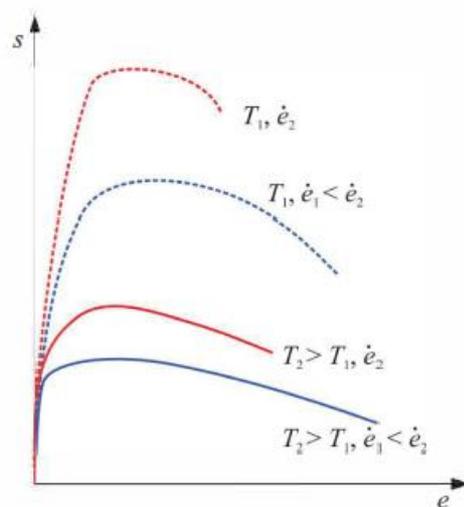


Figura 2.8: Influencia de la temperatura y la velocidad de deformación sobre las curvas esfuerzo – deformación.

3 DOBLADO DE TUBOS

En este capítulo se trata el doblado de tubos, abarcando varios puntos importantes de este proceso con el fin de diseñar unas prácticas que permitan conocer sus principales características. En primer lugar, se habla del conformado de tubos y su historia dentro de la industria. En segundo lugar, se comenta las variantes que ofrece el proceso, toda la teoría y ecuaciones que abarcan, para después introducir a nuestra máquina de ensayos. Finalmente, con toda la información recopilada, se presenta el modelo de prácticas y los pasos a seguir por los alumnos para realizarla.

3.1 Introducción al conformado de tubos

El uso de las piezas tubulares o de sección hueca en la industria ha ganado importancia sobre todo para el transporte de fluidos y gases, tanto para los medios de transporte actuales o para la producción en masa de ciertos productos. Su importancia en el último siglo para industrias como la aeroespacial o la automovil, ha permitido desarrollar nuevas técnicas de conformado de piezas tubulares o de sección hueca.

3.1.1 Historia del doblado de tubos y aplicación a la industria

Algunas evidencias arqueológicas sugieren que, en antiguas civilizaciones como la china, usaban tuberías de caña de bambú para el transporte de agua a las aldeas. También se descubrió que, en otras civilizaciones, por el año 2000 a.C. utilizaban tubos de arcilla para sus respectivas necesidades, mientras que en países tropicales debido a sus condiciones meteorológicas requerían del uso de tubos hechos con bambú (TYT Steel, 2018). Otro caso del uso de tuberías es en la antigua ciudad de Pompeya (Italia), que utilizaban tuberías de plomo, seguramente para el transporte de agua.



Figura 3.1: Tuberías de plomo utilizadas en la antigua ciudad de Pompeya (79 d.C)

Pero no sería hasta el siglo XIX cuando se empezó a utilizar piezas tubulares, donde la soldadura estaba cogiendo popularidad para la fabricación de tubos. El uso de piezas tubulares de hierro fundido se empezó a generalizar en Inglaterra y Francia a principios del siglo XIX, en gran mayoría para la distribución de gas para las farolas de las calles y, a mediados de ese siglo, se intentó fabricar tubos sin soldadura por diversos medios, llegando hasta el año 1887 en Estados Unidos, donde se fabricó el primer tubo de acero sin soldadura.

A principios del siglo XX, los tubos fabricados sin soldadura consiguieron una gran aceptación dentro del mercado, ya que implicaban un gran avance en industrias como la del automóvil. Para comienzos de este siglo,

con la creciente evolución industrial, el doblado de tubos empezó a coger fuerza en el mercado y su demanda aumentó.

En sus comienzos, el doblado de tubos se ha considerado un proceso difícil de realizar, que daba lugar a resultados de mala calidad y lleno de imprecisiones. Pero con el avance tecnológico, se han ido resolviendo gran parte de estos problemas. Al principio, se aplicó principalmente en piezas metálicas requeridas para la construcción o el sector agrícola.

Para la década de los 50 en algunos países, como Estados Unidos o China, empezaron a abrir sus puertas al extranjero para conocer de primera mano los nuevos procesos de fabricación. Comenzaron a producir las primeras máquinas dobladoras basadas en levas y engranajes que conseguían unos buenos conformados de la pieza de trabajo. Pero muchas de estas máquinas tenían una baja eficiencia, eran muy ruidosas y las fuerzas de flexión que podían aplicar sobre la pieza eran limitadas. Aun por los defectos que tenían, estas máquinas sirvieron de base para el desarrollo de las dobladoras que se usan hoy en día en la industria. Algunas empresas, como la estadounidense PINES, ya desarrollaron sus primeras máquinas por esta década (PINES, 2023).

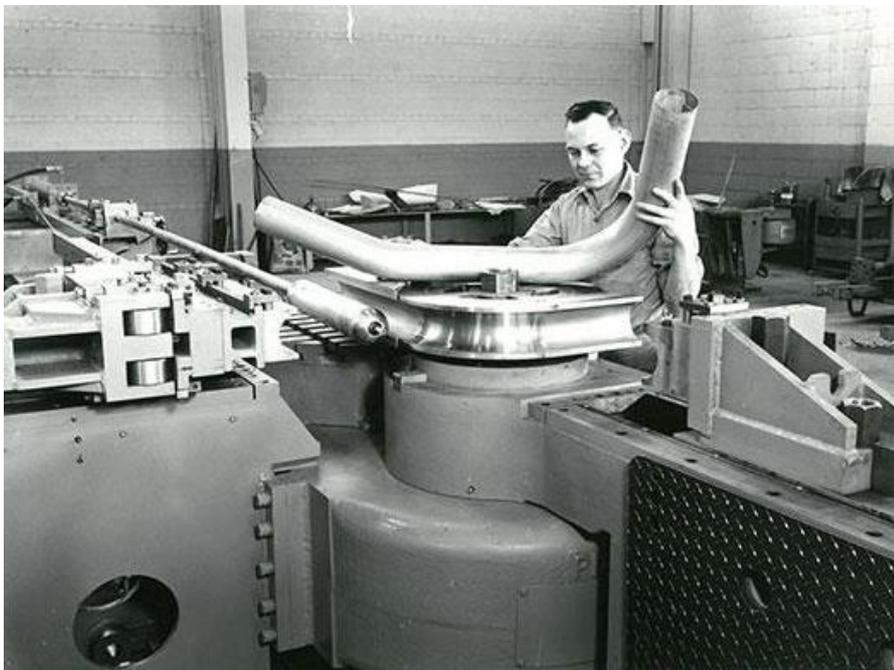


Figura 3.2: Primera dobladora de tubos desarrollada por la empresa PINES (PINES, 2023).

En los años 80, con el desarrollo de las antiguas máquinas y la introducción al mercado de la tecnología hidráulica, se pudieron resolver los problemas de eficiencia y ruido de las antiguas dobladoras. Por otra parte, se empezó a implementar el control numérico y los sistemas automatizados en estas máquinas como la empresa Unison que por el año 1993, diseñaron una dobladora de tubos totalmente automatizada y dos años más tarde desarrollarían dobladoras completamente eléctricas.

En la actualidad, para el desarrollo de las máquinas dobladoras de tubos, se ha incidido en mejorar el doblado para aplicarlo a piezas de diferentes perfiles, como los cuadrados o rectangulares. Además, su investigación en los últimos años ha implicado una mejora de calidad en los productos y en el tiempo de proceso, pudiendo en algunas hacer fabricaciones en serie.



Figura 3.3: Primera máquina dobladora CNC de la empresa PINES en 1986. (PINES, 2023).

Los tubos son una pieza presente en la gran mayoría de los objetos, herramientas o estructuras que se ven cada día. Estas piezas se emplean en muchísimas y diferentes instalaciones industriales como en las plantas químicas para el transporte de gases o líquidos, en sistemas de producción para el transporte alimentario o en plantas farmacéuticas. Por lo general, los tubos doblados usados en instalaciones industriales suelen realizarse con acero debido a las grandes presiones y temperaturas altas que debe soportar la pieza o también suelen verse hechas de acero inoxidable, por su predisposición a evitar la corrosión y oxidación.

También los tubos doblados implican un papel importante en la seguridad del operador. Desde la fabricación de cabinas para máquinas industriales como tractores o máquinas de explanación hasta simples barandillas o elementos de seguridad en barcos o transportes navales. Además, es un elemento muy utilizado en el ámbito estructural, siendo una pieza importante para el diseño de almacenes automatizados, hasta incluso para elementos estructurales de una atracción de feria, comúnmente realizados con tubos de hierro.

3.1.2 Procesos de conformado de tubos

La gran demanda en sectores como el del automóvil o el sector aeroespacial ha implicado un gran interés en el uso de los tubos como un elemento principal para sus grandes proyectos. También la necesidad actual de utilizar componentes más ligeros, resistentes y con una vida útil más duradera ha generado mayor demanda de este tipo de piezas. Por ello, es normal encontrar diferentes procesos que permitan la conformación de tubos o piezas de sección hueca, ya sea para disminuir el espesor de sus paredes, expandir su diámetro u obtener una sección determinada (rectangular o circular). Entre los procesos más destacados en la industria se pueden encontrar los siguientes:

Hidroconformado

Este proceso de conformado en frío consiste en la aplicación de un fluido a presión (normalmente agua) que expande las paredes del tubo para obtener generalmente una sección variable con zonas suaves en la superficie de la pieza final. El tubo recto es previamente introducido en una matriz y sujetado por ambos extremos por unos punzones o mordazas para evitar la expansión por esa dirección (Paso 1). Una vez colocado, se cierra con la otra matriz (Paso 2). Ambas matrices en las que el tubo está presionado contienen la forma o sección que obtendrá la pieza tras el proceso.

Tras esto, por los mismos punzones o mediante otro sistema de alimentación, se introduce el líquido a presión (Paso 3) que fluye en el interior del tubo hasta el punto de que empieza a expandirse y adaptarse a la forma de las matrices. Finalizada la operación, se retiran las matrices y se obtiene la pieza final (Paso 4). Este proceso también es comúnmente usado para el conformado de chapas.

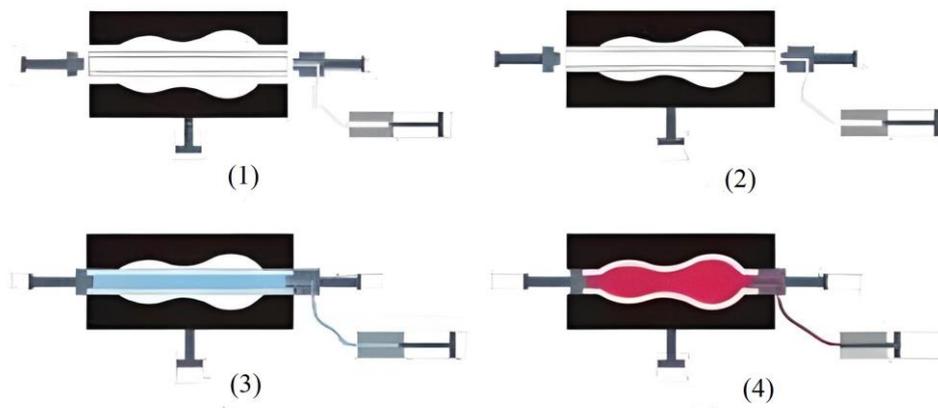


Figura 3.4: Proceso de hidroconformado

Extrusión

Proceso por el cual se aplican fuerzas de compresión a través de un pistón, que avanza a una velocidad v y aplica una fuerza F para hacer fluir la pieza de trabajo a través de una abertura u orificio, para conseguir la sección transversal a la salida de esta. Permite trabajar con una gran variedad de formas, además de conformar piezas en caliente.

Debido a las grandes fuerzas de fricción que ocurren al desplazar el material de trabajo a través de la abertura, es necesario un aumento de la fuerza del pistón para hacer pasar la pieza por la salida del recipiente. Por ello, es frecuente usar mandriles que evitan este tipo de problemas y además permiten realizar tubos cuyo diámetro interior corresponde con las dimensiones del mandril.

Este proceso descrito se conoce como extrusión directa, pero también existen otras variantes como la extrusión indirecta. En esta operación, el troquel está montado sobre el pistón. Al avanzar el pistón sobre el tocho, obliga al metal a fluir a través del orificio central en dirección opuesta a la del pistón, sin producirse fricción en las paredes del recipiente. Esto provoca que la fuerza requerida sea menor que en la extrusión directa, aunque tiene limitaciones debidas a la rigidez del pistón hueco y de sujeción del producto extruido a la salida.

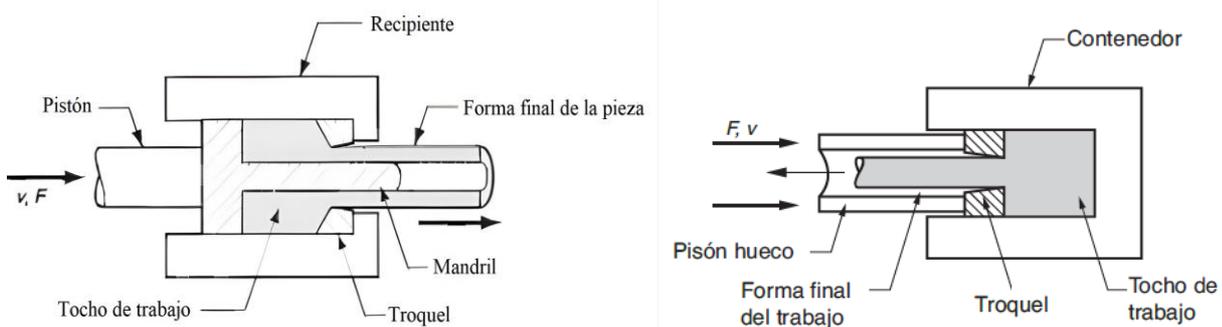


Figura 3.5: Proceso de extrusión con mandril: a) Extrusión directa; b) Extrusión indirecta

Estirado

En dicha operación se consigue reducir o transformar la sección transversal de una barra o tubo jalando de este. A primera vista, es un proceso muy parecido a la extrusión, compartiendo muchas variables como la reducción de la sección transversal, la fricción o el ángulo de los dados. La diferencia entre estas dos operaciones es en la forma de desplazar la pieza de trabajo. Mientras en la extrusión es necesario de un pistón o dado para empujar el material, en el estirado se jala a través de su extremo para que se desplace a través del recipiente.

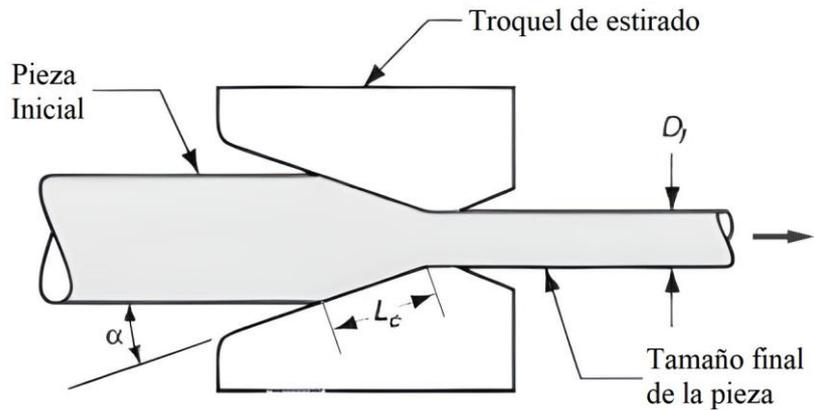


Figura 3.6: Proceso de estirado de tubos

Rechazado

El rechazado, en general, es un proceso que implica el conformado de parte asimétricas sobre un mandril usando generalmente rodillos. Se puede llegar a obtener piezas asimétricas tanto grandes como pequeñas, con buen acabado superficial e implica un bajo coste de material, por lo que es un proceso económico de realizar.

Cuando se realiza para piezas tubulares, el objetivo principal es reducir el espesor de las piezas, rechazándolas por un mandril a través de los rodillos u otra herramienta similar. Este proceso para los tubos se puede realizar tanto externa como internamente con piezas de espesor constante. Las piezas tubulares obtenidas a través del rechazado son frecuentemente utilizadas para motores de cohetes o misiles y componentes automovilísticos.

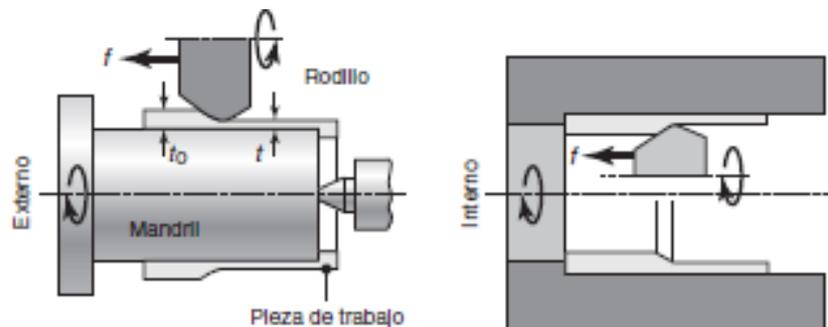


Figura 3.7: Dos formas de rechazado de tubos: a) De manera externa; b) De manera interna

Perforado rotativo de tubos

El perforado rotativo de tubos o también conocido como proceso Mannesmann consiste en un proceso de trabajo caliente, desarrollado en la década de 1880, para obtener tubos sin costura (tubo formado hecho de una sola pieza, sin necesidad de soldadura o uniones) de diferentes espesores. Debido a la utilización de dos rodillos opuestos, se puede llegar a considerar un proceso de laminación.

El proceso consiste en someter a fuerzas radiales de compresión respecto al eje de una barra redonda, provocando así tensiones de tracción y con esto empieza a generar una pequeña cavidad en el centro de la barra que comienza a crecer. A través de un mandril y los rodillos giratorios, se empieza a controlar el tamaño del orificio y su acabado. Es importante en este proceso que la pieza inicial sea de alta calidad y no contenga defectos que promuevan fallas con gran rapidez durante el formado.

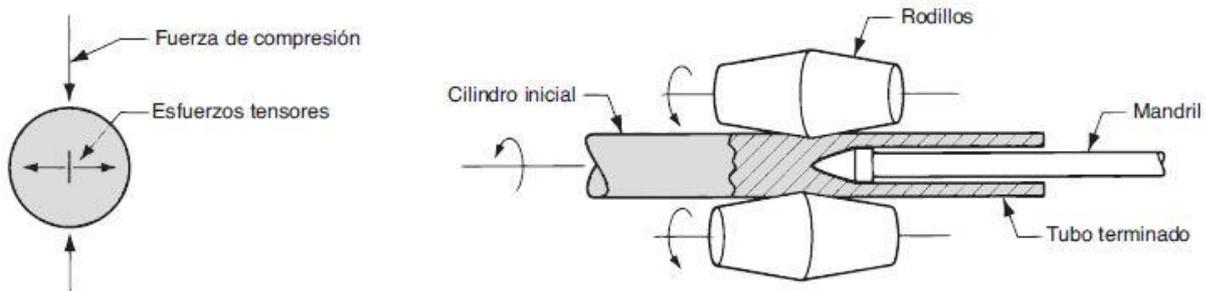


Figura 3.8: Perforado rotativo de tubos o Proceso Mannesmann

Laminado de tubos

El proceso de laminación de tubos permite reducir el diámetro y espesor de piezas tubulares a través de rodillos de forma. Esta operación se puede realizar con mandril (fijo o móvil) o sin necesidad este. Otra variante del proceso a través de un molino de laminación Pilger, donde el tubo y el mandril interno son sometidos a un movimiento recíprocante.

Durante el proceso, el tubo avanza y gira, iniciando un ciclo de reducción. Como consecuencia, el tubo sufre una reducción de diámetro y del espesor de pared.

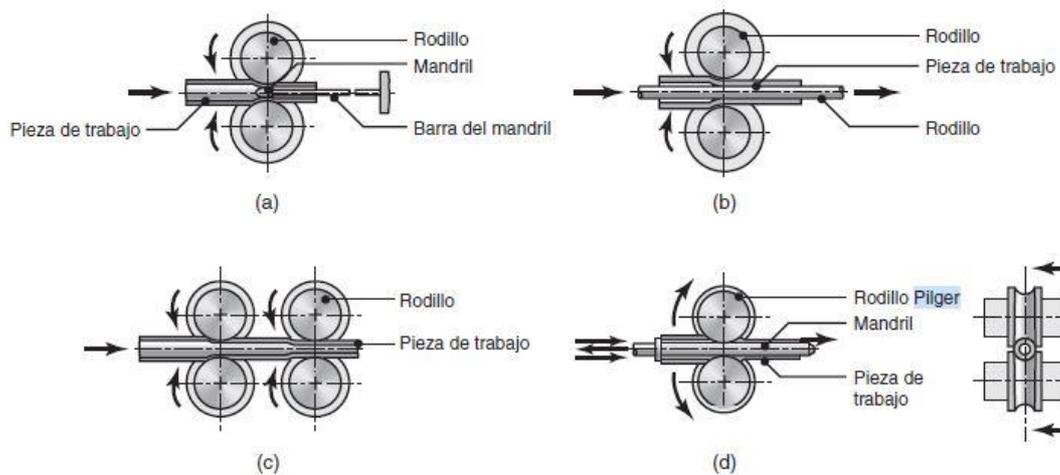


Figura 3.9: Laminación de tubos: a) Con mandril fijo; b) Con mandril móvil; c) Sin mandril; d) Laminado Pilger con mandril y rodillos de forma

Fundición de tubos

La fundición es un proceso de moldeo que abarca aproximadamente 6.000 años de antigüedad. Consiste en llenar, con un material líquido, un molde con ciertas características geométricas. Más tarde, el líquido se enfría y solidifica. Es un proceso muy utilizado para producir formas complejas que a partir de otros métodos o procesos serían de difícil obtenerle resultados favorables. En la fundición de metales se calienta el metal hasta su estado líquido y se vierte al molde, se deja enfriar y se solidifica para posteriormente extraer la pieza.

Existen muchas variantes de este proceso, pero para la obtención de piezas tubulares o de sección hueca es recomendable el uso de un método particular: la fundición centrífuga real. Este método consiste en verter el metal fundido en un molde rotatorio a través de uno de sus extremos. La gran velocidad de rotación provoca que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. Otros métodos similares son la fundición centrífuga o la fundición semicentrífuga.

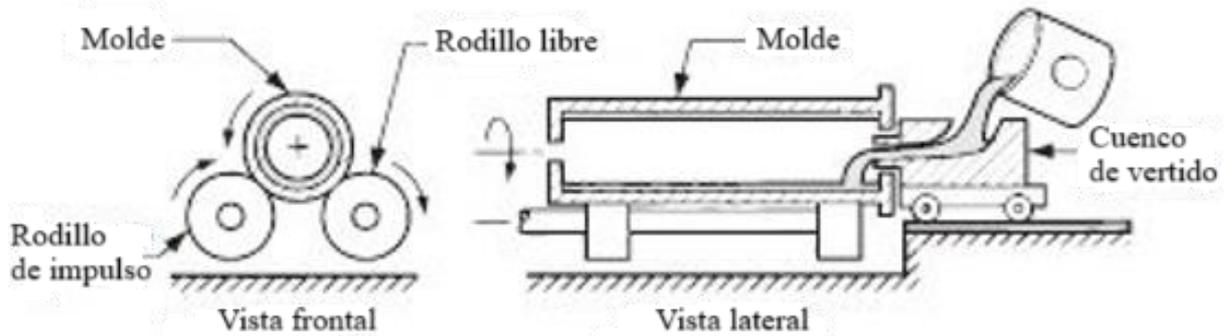


Figura 3.10: Fundición centrífuga real

Doblado de tubos

Este proceso, que será objeto de estudio en este proyecto, es de los más comunes en la industria. El objetivo principal es conseguir conformar la pieza para que en la zona deformada obtenga un radio y ángulo de curvatura determinados, sin variar otras características geométricas como el diámetro o el espesor de la pared del tubo. Todo este proceso se realiza a partir de diferentes fuerzas de presión y fricción ejercidas por el conjunto de elementos que conforman la máquina dobladora. Aunque a lo largo de la operación mantener el diámetro o la sección del tubo, como se verá más tarde, no es una tarea fácil, por lo que es normal requerir el uso de mandriles o rellenos como arena que se introducen en el interior del tubo, consiguiendo reducir o eliminar estos defectos a lo largo del proceso.

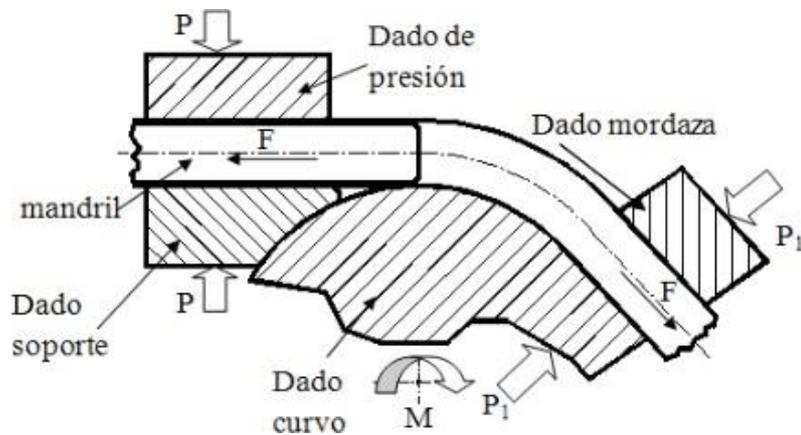


Figura 3.11: Proceso de doblado de tubos con diferentes fuerzas aplicadas.

3.2 Doblado de tubos

El doblado de tubos ha adquirido una gran importancia e interés sobre las empresas para su uso en diferentes sectores industriales. El uso de estos componentes es variado, llegando desde el transporte de fluidos o gases en industrias químicas a ser utilizados como elementos estructurales para andamios o edificios. En este apartado se mostrará los diferentes métodos de doblado de tubos y sus diferencias, el comportamiento de la pieza durante la operación de curvado y los parámetros y defectos de la operación.

3.2.1 Variantes del proceso de doblado de tubos

Los últimos avances de la sociedad han provocado una mayor exigencia a las industrias para conseguir productos finales de mayor calidad y de mejores propiedades. Esto ha implicado que, cada vez más, se busque utilizar

tubos de diferentes secciones, materiales o propiedades geométricas, ya sea para abaratar costes o mejorar el rendimiento del producto. Para el caso del proceso del doblado de tubos, no existe un solo método capaz de conformar todos los tipos de tubos. Es por ello por lo que, con el tiempo, se han ido desarrollando nuevas máquinas y técnicas que permitan, para tubos de cualquier característica, realizar la operación de doblado. Nayyar (2017), en su libro, comenta los diferentes métodos a elegir:

Doblado con rodillos

Este método se utiliza especialmente para enrollar tubos de gran longitud. Consiste en varios rodillos de sección circular (lo más frecuente es encontrar desde 3 a 4 rodillos) colocados en forma de patrón triangular. Además, como se aprecia en la figura 3.12, los rodillos se dividen en dos grupos: los inferiores (*Driven roll*), que tiran de la pieza, desplazando el tubo a lo largo de la máquina; y los superiores (*Bending roll*), que evitan su desplazamiento en cualquier otra dirección y ejercen presión sobre la pieza. El curvado se puede realizar ajustando los rodillos entre sí, según sea necesario para alcanzar el radio o diámetro requerido.

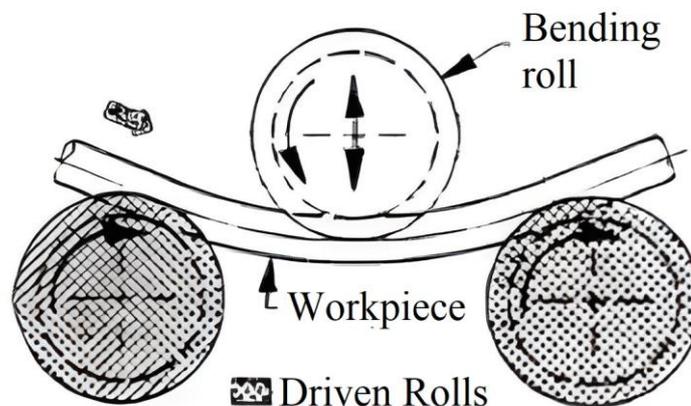


Figura 3.12: Doblado con rodillos

A diferencia de otros métodos, este puede curvar a una gran variedad de ángulos y radios usando los mismos rodillos en la operación, y permite el conformado de todo tipo de perfiles, ya sean rectangulares o circulares. Por otro lado, es un proceso lento y complejo para obtener resultados exactos. Además, no es conveniente su uso para tubos de un espesor de pared fina, ya que puede provocar graves fallos si los radios de curvatura de los rodillos son pequeños.

Doblado a tracción:

Este tipo de doblado permite el doblado de piezas tubulares irregulares, donde su perfil se sujeta en los extremos por medio de unas mordazas y es curvado conforme se estira alrededor de una matriz fija.

Usualmente hay menor recuperación elástica cuando el trabajo se realiza mientras se estira. Tras finalizar el proceso de doblado, los extremos sujetos deber ser cortados debido a la deformación que sufren estos por la acción de las mordazas. Esta técnica está limitada a doblados de radios de curvatura grandes, pero es apropiado para doblados que no son circulares.

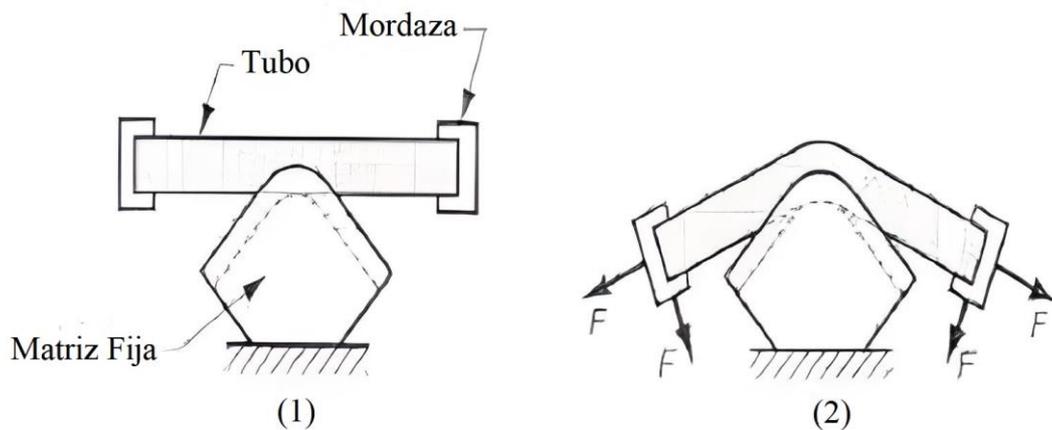


Figura 3.13: Doblado de tubo a tracción

Doblado por prensa hidráulica

Consiste en dos matrices de presión (*Rotated pressure dies*) que sujetan la pieza tubular para mantenerla en una posición fija, evitando cualquier tipo de desplazamiento en otra dirección durante toda la operación. Por otra parte, mediante un sistema hidráulico (*Hydraulic piston*) se moverá una prensa o matriz de conformado (*Bending form*) contra el tubo. Con la presión que ejerce la prensa alrededor del tubo y las matrices de sujeción al aguantarlo, se consigue el resultado deseado. Se suele aplicar habitualmente para piezas tubulares de espesores de pared gruesos.

Destaca por ser un proceso barato, ya que solo requiere de un utillaje sencillo y adaptable a la máquina para realizar la operación. Además, ofrece versatilidad para el doblado de otras piezas de trabajo, como barras o láminas metálicas.

Aunque, por otra parte, se reconoce como un proceso por el cual se obtiene poca precisión en sus propiedades geométricas y donde las altas presiones provocadas hacen que los tubos lleguen hasta aplastarse. Además, no es recomendable su adaptación a producciones en serie, ya que consiste en un proceso lento en su ejecución.

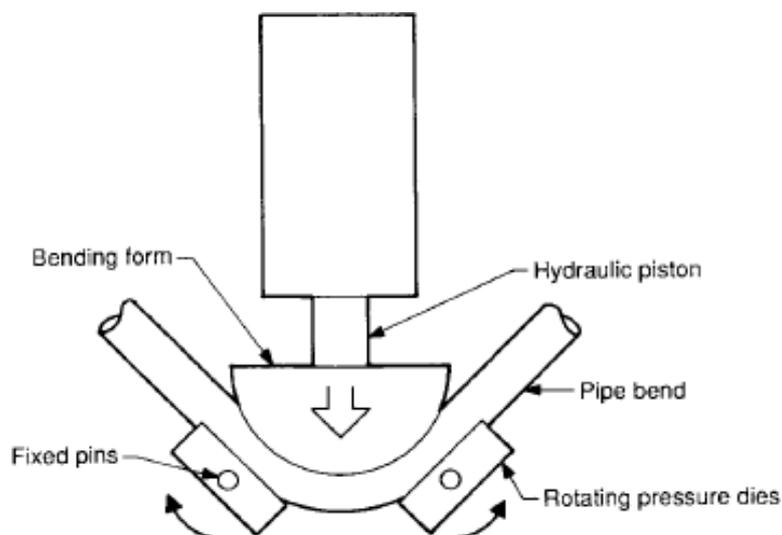


Figura 3.14: Doblado por prensa hidráulica

Doblado por compresión

Está formado por una matriz formadora (*Fixed Form*), una matriz de deslizamiento (*Wiper shoe*) y una abrazadera o mordaza (*Clamp*). El tubo es desplazado alrededor de la matriz formadora gracias al movimiento de la mordaza, que gira alrededor de esta. La matriz formadora en este caso es estacionaria, es decir, no realiza ningún tipo de desplazamiento o giro a lo largo del proceso, manteniéndose en una posición fija. Una peculiaridad de este proceso, como bien indica su nombre, es que el grado de compresión es mucho mayor que en otros métodos. Su uso es común para piezas de paredes gruesas y radios de curvatura grandes.

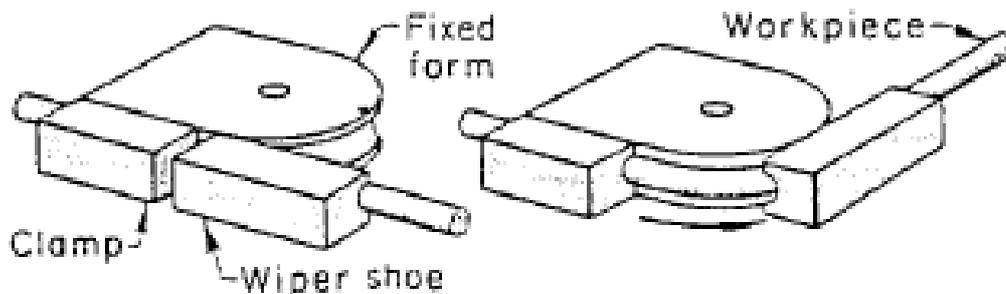


Figura 3.15: Doblado por compresión

Doblado por arrastre rotativo

Es la forma más popular de doblar tubos en el mercado. Al igual que el doblado por compresión, está compuesta de tres elementos muy parecidos: la matriz de sujeción (*Clamp*), la matriz de presión (*Pressure Die*) y la matriz de doblado rotatoria (*Rotating Form*). La gran diferencia con respecto al anterior método es que la matriz de doblado para este caso no será estacionaria, sino que realizará un movimiento giratorio conforme se vaya “arrastrando” el tubo. A medida que la matriz gira, la de presión sujeta firmemente el tubo para evitar cualquier otro desplazamiento. En este caso, el grado de adelgazamiento de las paredes es mayor que en el doblado por compresión. Se usa frecuentemente para tubos de radios de doblado pequeños y espesores de paredes delgada.

Por otra parte, es el único de los métodos estudiados que permite el uso de mandriles o rellenos para evitar los defectos que próximamente se comentarán en esta memoria, como el arrugamiento o el aplanamiento.

Es un método preciso y rápido, pero implica el uso de diferentes utillajes para cada tubo a conformar, lo que da lugar a un alto coste de operación y poca flexibilidad para doblar todo tipo de tubos.

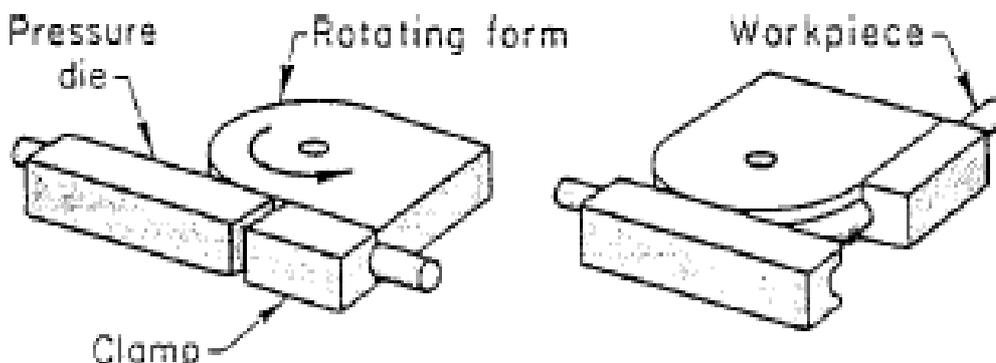


Figura 3.16: Doblado por arrastre rotativo

A continuación, se muestra en la siguiente tabla un resumen de los diferentes métodos de doblado de tubos mencionados y sus principales características:

	Radios de doblado	Espesor de pared de la pieza	Precisión	Coste de operación	Flexibilidad de operación
Doblado por rodillos	Grandes	Grueso	Baja	Alto	Baja
Doblado a tracción	Grandes	Delgado	Alta	Bajo	Alta
Doblado por prensa hidráulica	Medio	Grueso	Alta	Bajo	Alta
Doblado por compresión	Grandes	Grueso	Alta	Bajo	Baja
Doblado por arrastre rotativo	Pequeños	Delgado	Alta	Alto	Baja

Tabla 3.1: Propiedades de los diferentes métodos de doblado de tubos

Entre todos los procesos mencionados, el doblado por arrastre rotativo será el método para estudiar y analizar en esta memoria.

3.2.2 Teoría del doblado de tubos por arrastre rotativo:

Como describe Li Heng et al. (2006) en su estudio, el tubo en una máquina dobladora por arrastre rotativo está sometido a una serie de fuerzas de presión y fricción provocadas por los diferentes elementos que actúan en la operación, mientras la matriz de doblado realiza un momento de flexión M a una cierta velocidad de giro ω alrededor de un centro de giro O . Como se puede observar en la figura 3.17, actúan sobre el tubo varias fuerzas de presión como N_p que es la presión ejercida por la matriz de presión, N_m provocadas por el mandril o relleno hacia las paredes del tubo, N_w realizadas por la matriz de deslizamiento. También, tanto la matriz de sujeción como la matriz de doblado ejercen sobre uno de los extremos del tubo una presión N_c .

Por otro lado, entre las fuerzas de fricción presentes en el proceso se puede observar: una fuerza de f_c que realizan tanto la matriz de doblado y la matriz de sujeción hacia el tubo al desplazarse; f_{mm} que provoca el mandril, cuando se arrastra en el interior del tubo, a las paredes de la pieza y f_p que ejerce la matriz de presión sobre la pieza.

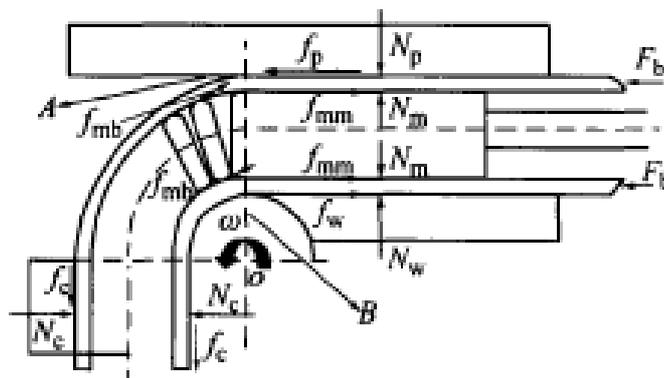


Figura 3.17: Fuerzas de presión y fricción que actúa en el doblado.

Todas estas fuerzas anteriormente mencionadas generan sobre la pieza un estado de tensiones y deformaciones. Para el análisis de estas variables y de la pieza final conformada, se realizarán una serie de suposiciones para facilitar y simplificar el estudio del tubo curvado:

- Se supone que cada fibra del perfil del tubo se encuentra en un estado de tensión – deformación de tracción o compresión unidireccional, despreciando las tensiones residuales, tangenciales y circulares.
- Suposición de modelo de material bilineal: Se supone que el tubo es de un material homogéneo y un cuerpo de comportamiento elástico – plástico.
- Suposición de deformación plana: Se supone que la sección transversal del tubo es siempre plana antes y después de la deformación, y la posición de centro geométrico de la sección no cambia.

Con estas suposiciones, se puede analizar gran parte de las variables, ya sean tensiones, deformaciones o esfuerzos, y ver el comportamiento que ha ido teniendo la pieza a lo largo del proceso. Partiendo de una pequeña sección de la pieza conformada, como se aprecia en la figura 3.18, se observan las siguientes variables al comportarse de manera elasto-plástica:

M: Momento flector

R: Radio de curvatura o de doblado

ε_o : Deformaciones en extradós

ε_i : Deformaciones en intradós

σ_o : Tensiones en extradós

σ_i : Tensiones en intradós

σ_z : Tensiones en el espesor del tubo

O: Centro geométrico de la sección

c_o : Distancia fibra superior – línea media

c_i : Distancia fibra superior – línea media

ρ_ε : Radio curvatura de fibra cualquiera

P: Punto de estudio

s: Distancia punto P a fibra cualquiera

u: Distancia línea media a punto P

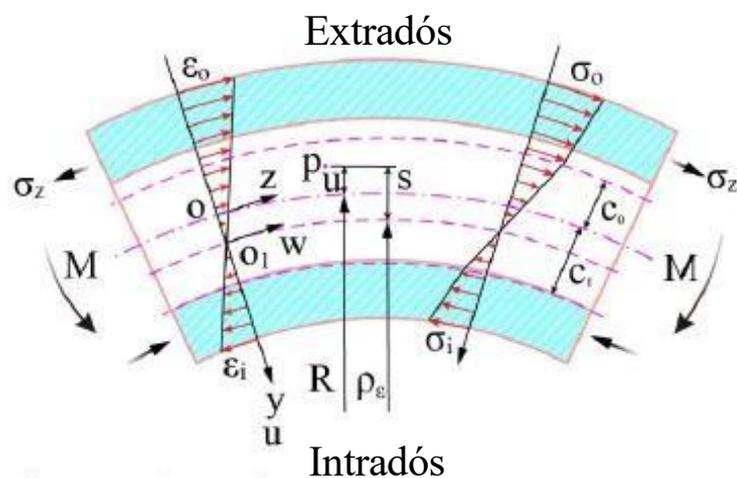


Figura 3.18: Esfuerzos, tensiones y deformaciones de un tubo doblado.

Tras ser sometido a esfuerzos de flexión M , analizando a primera vista la sección del tubo ya conformado, se puede diferenciar dos zonas destacables: el extradós o zona exterior de la pieza y el intradós o zona interior. El extradós es la zona exterior de la pieza, que está en todo momento en contacto con las matrices de presión y donde la pieza se verá sometida a fuerzas de tracción en el espesor de su pared. Esto crea un estado de tensiones σ_o que irán disminuyendo conforme se acerca al centro del tubo. Al contrario, el intradós permanece en contacto en la operación con la matriz de doblado y la cual le genera tensiones de compresión σ_i a lo largo de su espesor. Además de las tensiones generadas, se producen un campo de deformaciones ε_o y ε_i en el extradós e intradós, respectivamente.

Un suceso común es el desplazamiento de la línea o capa neutra del tubo durante el conformado. La línea o capa neutra es la zona de la pieza donde se produce el equilibrio de las tensiones de compresión y tracción, siendo esta una zona de tensión nula. Se supone que la línea neutra está ubicada en el centro geométrico O de la pieza y su posición está definida en el sistema de referencia Oxy . Por otra parte, toda línea o fibra superior e inferior a la línea neutra estarán posicionadas en referencia al sistema Ouw .

La línea neutra inicialmente estará a una distancia del centro de curvatura igual al radio de doblado R que se aplicará en el conformado. En cambio, las demás fibras tienen por definición un radio de curvatura ρ_ε . Por otra parte, si se escogiese un punto cualquiera P de la pieza y se midiera la distancia de dicho punto a las fibras (s) y la línea neutra (u), es fácil observar que la distancia será mayor cuanto más nos alejamos del centro geométrico en el caso de las fibras sometidas a compresión.

Por otro lado, analizando el tubo desde su sección circular, es fácil comprobar como tiende hacia un estado plástico a lo largo del proceso. En la figura 3.19, se muestra una evolución del comportamiento de la pieza, pasando de un estado elástico a un estado plástico. Como se ve en la figura de la izquierda, tras un breve tiempo transcurrido de la operación, la pieza muestra dos zonas: una zona predominante de color azul (zona elástica) y una zona rosa (zona plástica), que comienza en los extremos de la sección, a una distancia d del centro geométrico. Ambas zonas se delimitan entre sí por la línea límite elastoplástica (*Boundary of elastoplastic zone*), cuya posición está determinada a una distancia c , medida desde el centro de la sección circular.

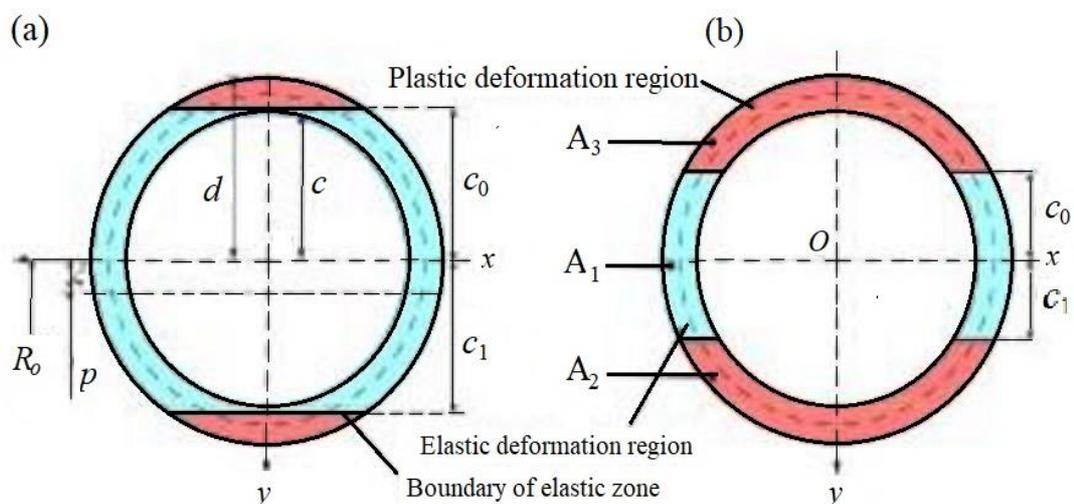


Figura 3.19: Evolución elástico – plástico del tubo en su sección circular

Pasado un tiempo del proceso (figura de la derecha), empieza a predominar la zona plástica, aumentando su área en la dirección y del plano. Esto permite dividir su sección en tres zonas, que se comportan de manera distinta: La zona exterior de deformación plástica por tracción A_3 , la zona media de deformación elástica A_2 y la zona de deformación plástica por compresión A_1 . Tanto A_3 como A_1 se delimitan de la zona elástica por la línea límite elastoplástica, a una distancia c_0 y c_1 , respectivamente.

La magnitud del crecimiento de las zonas de comportamiento plástico dependerá, en gran medida, de una serie de parámetros, como pueden ser el material de la pieza, los elementos de la máquina o algunas características geométricas de su sección.

Parámetros de doblado de tubos:

Tras un estudio de las diferentes fuerzas aplicadas y el comportamiento de la pieza durante la operación de doblado, es conveniente analizar los diferentes parámetros que influyan en la calidad del resultado de la pieza final. Entre los parámetros más relevantes encontramos:

- **Factor de pared:**

Denotado como WF , es un factor adimensional que relaciona el diámetro exterior de la pieza tubular y el espesor de la pared de este. Su valor permite determinar antes de la operación la posibilidad de que se generen defectos en la pieza. Cuanto mayor sea el valor de WF , mayor será la probabilidad de que se produzcan fallos (comúnmente el arrugamiento en el intradós). En cambio, un valor considerablemente pequeño, permite reducir las posibilidades de que se generen.

$$WF = \frac{D}{t} \quad (3.1)$$

Donde D es el diámetro exterior de la pieza y t es el espesor de la pared del tubo.

Li Heng et al. (2006), comprobaron que tanto D como t no tienen la misma influencia en el comportamiento de la pieza al ser esta doblada. Para un mismo valor de t , un aumento del valor de D implica una menor capacidad por parte de la pieza de soportar las presiones. Como consecuencia, el tubo tiende a presentar una serie de defectos. En cambio, manteniendo un valor de diámetro constante y variando el valor del espesor de la pared, es apreciable que la tendencia a formarse defectos en cualquier zona de la pieza se reduce considerablemente respecto al caso anterior.

Además, en otro de sus estudios, Li Heng et al. (2013), estableció que los tubos de aluminio con un $WF > 20$ son muy utilizados en la industria, pero que presentaba efectos de no linealidad en el proceso de doblado, por lo que estableció este valor del factor de pared como un límite para la tendencia al arrugamiento.

- **Radio de curvatura:**

El radio de curvatura R o también conocido como radio medio de curvatura es la distancia exacta que va desde el centro de la matriz que conformará la pieza hasta el centro del tubo que se doblará. En el caso de tubos redondos se hace siempre referencia al radio medio, ya que este está relacionado con la línea central que pasa por el tubo.

Como se muestra en un artículo publicado por Tecnocurve (2019), los radios de curvado posibles, teniendo en cuenta el diámetro de la pieza a conformar pueden variar en torno a 1,5 – 5 veces el valor del diámetro, donde los extremos del intervalo se definen como los radios medio mínimo y radio medio máximo de curvatura.

Por otro lado, existe una regla presentada por Agarwal (2006) que permite estimar el radio de curvatura mínimo para el cual el tubo a conformar no sufrirá arrugamiento. Aunque es una norma bastante usada, no tiene en cuenta otros tipos de factores como son el material de la pieza, el relleno o la calidad de las herramientas utilizadas, por lo que no se cumple para todo tipo de tubos.

$$\frac{R}{D} \geq 2 \quad (3.2)$$

Donde R (mm) es el radio de curvatura mínimo para el cual no se produce arrugamiento y D (mm) es el diámetro exterior de la pieza tubular. En base a varios ensayos es apreciable que, al ensayar con un mismo tubo, el uso de radios de curvatura pequeños aumenta la probabilidad de aparición de defectos en la pieza, en cambio, aumentando este valor se irá reduciendo considerablemente estos fallos mecánicos.

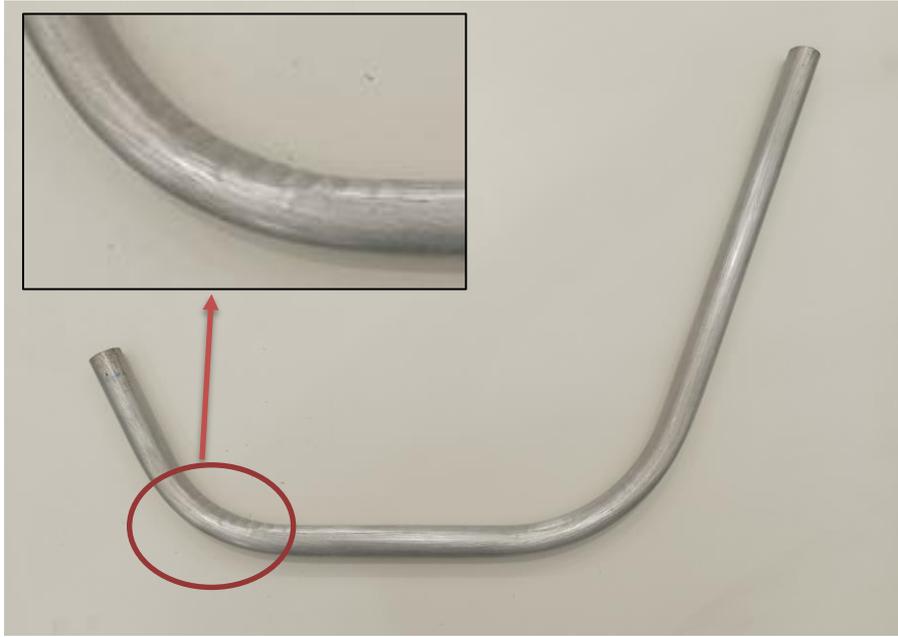


Figura 3.20: Pieza doblada a diferentes radios de curvatura.

Como se muestra en la figura 3.20, el extremo izquierdo ha sido doblado con un radio de curvatura menor que el aplicado en el extremo derecho, por lo que se puede observar (aunque de manera no muy excesiva y apreciable), la formación de arrugas para el doblado para el radio de curvatura más pequeño.

PRO-TOOLS (2015) a través de la siguiente gráfica, enseña a determinar el tipo de operación de doblado a realizar, según el radio de curvatura R , el diámetro D y el factor de pared WF :

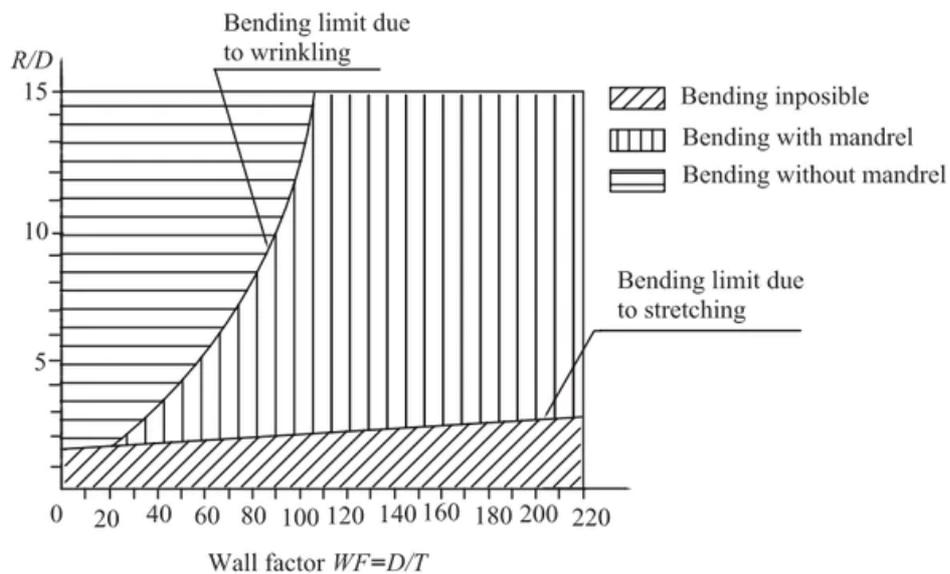


Figura 3.21: Límites técnicos de la operación de doblado.

- **Viabilidad de doblado:**

Existe un factor adimensional K , que permite comprobar si el curvado de un tubo, de diámetro D y espesor t , realizado a un radio de curvatura R , es viable. Dicho coeficiente K se considera en base a un rango de valores y se utiliza para determinar si es posible doblar un tubo según su sección (redondo, cuadrado o rectangular) y el

grado de dificultad del curvado.

La empresa Tecnocurve (2020), en su página, presenta la siguiente expresión, para determinar el factor de viabilidad de doblado K para tubos de sección circular:

$$K = \frac{R \cdot t}{D^2} \quad (3.3)$$

El grado de dificultad del curvado es inversamente a su valor, es decir, cuando el valor de K es alto significa que el proceso de doblado para dicho tubo es más sencillo, pero para valores de K menores, la operación alcanza cierta dificultad. En general, según el valor de K es posible conocer cómo se realiza la operación de curvado:

- **$K > 0,3$ (Doblado fácil):** El curvado se realiza sin problemas y no es necesario utilizar ningún equipo o elemento adicional en la operación.
- **$0,3 > K > 0,1$ (Doblado moderado):** El proceso de doblado se dificulta y será necesario el uso de un mandril o relleno
- **$0,1 > K > 0,08$ (Doblado complicado):** Es necesario el uso de un mandril fijo y una matriz deslizante o dado alisador, que permita evitar fallos en la pieza.
- **$0,08 > K > 0,05$ (Doblado de gran dificultad):** Para realizar la operación se necesitará usar un mandril articulado y un matriz deslizante.
- **$K < 0,05$ (Doblado imposible):** El tubo según las condiciones de la operación, es imposible doblarlo. Es necesario realizar varios ensayos para conseguir un aumento del coeficiente K .

La ecuación 3.3 mostrada anteriormente, se ha supuesto para el doblado de tubo de acero. En el caso de que la operación se realizase con un material distinto, se deberá aplicar una reducción al valor de K . Para tubos hechos de un acero inoxidable AISI 304, el coeficiente K se reduce aproximadamente un 20%; para tubos de acero inoxidable AISI 316, se reduce un 25% y para un aluminio 6060, K se reduce un 35%.

Una forma de determinar si un tubo es viable de ser doblado es a través de una gráfica que relaciona el radio de curvatura R y el espesor t , para un mismo diámetro de tubo D .

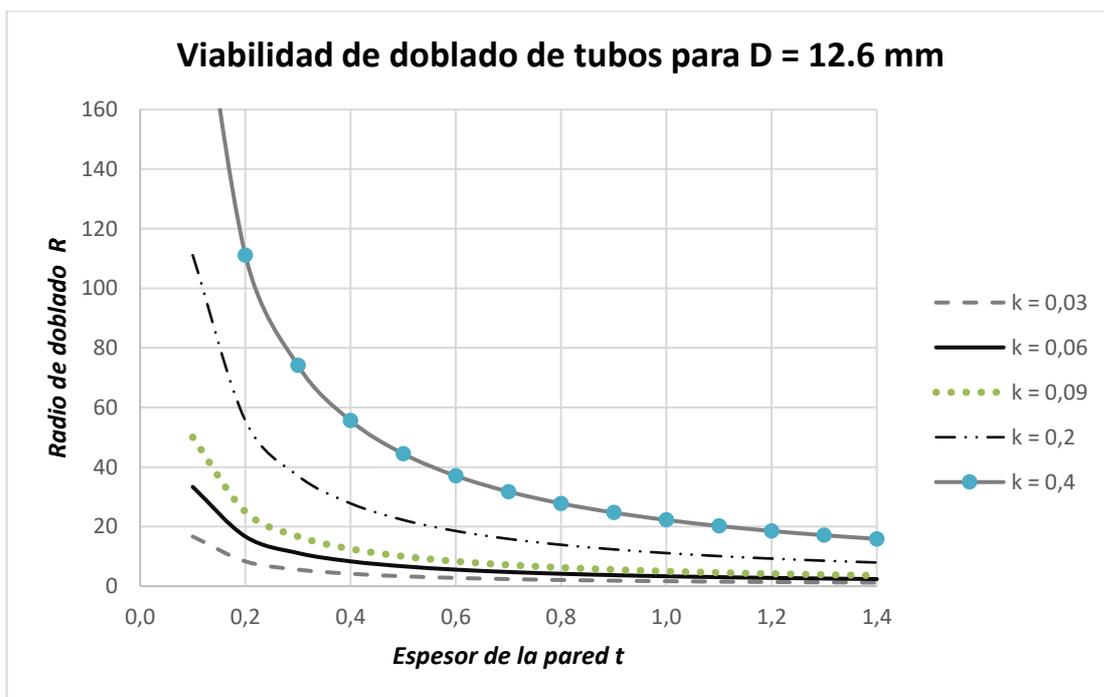


Figura 3.22: Gráfica de viabilidad de doblado para un tubo de diámetro de 12,6 mm de aluminio 6060

Es fácil comprobar según lo mostrado en la Figura 3.22 que, para valores de R bajos, la viabilidad de doblar el tubo será menor, y un aumento del espesor junto con un aumento del radio de curvatura permite realizar doblados con mayor facilidad.

- **Material:**

El material de la pieza tiene una gran influencia en el proceso, determinando en muchos casos, el resultado final de la pieza. Materiales de alta ductilidad y gran resistencia permiten ser doblados con gran facilidad al contrario de los que presentan una baja ductilidad y poca resistencia. También, los materiales que presenten una alta elasticidad dificultan, tras realizar el doblado, que la pieza adquiera la curvatura deseada y en ciertos casos, vuelva a su estado original. En cambio, los materiales de menor elasticidad consiguen mantener la forma curvada obtenida tras realizar el doblado.

Los materiales más utilizados en el conformado de tuberías y, en concreto, en el doblado de tubos son el aluminio, cobre, aceros y sus respectivas aleaciones.

Para las prácticas se optará por el uso de tuberías de aluminio 6060 T4. El aluminio, destaca por ser un material resistente a la corrosión, maleable, de buena conformabilidad y de peso ligero. Su aleación T4, consiste en una aleación que ha sido sometida previamente a un proceso de solución, a temperaturas entre los 450-550 °C, después a un tratamiento de temple (proceso de enfriamiento rápido) a unos 20 °C y finalmente se le realiza una maduración natural durante unos 8 días para que adquiera dureza, para mejorar las propiedades mecánicas de la pieza.

Defectos de doblado:

En base a los parámetros de operación mencionados, existen una serie de defectos a tener en cuenta al ensayar, ya que pueden afectar en la calidad, vida útil y propiedades de la pieza final.

- **Arrugamiento:**

Es el principal defecto de la operación y se localiza en la zona de intradós de la pieza, la que contacta con la matriz de doblado. Dicha zona de la pieza empieza a ser sometida a fuertes tensiones de compresión hasta llegar a cierto valor crítico por el cual se generan arrugas. Este defecto provoca una reducción en la resistencia, rigidez y vida útil del tubo.

La aparición de este defecto está asociado a varios factores. Uno de ellos, es el ya mencionado factor de pared WF . Cuando este alcanza altos valores, el arrugamiento es inevitable y la aparición de arrugas es apreciable a simple vista, como se puede observar en la figura 3.23. Otro factor es el uso adecuado de los diferentes elementos de la máquina dobladora. Enrico Simonetto (2017), realizó una serie de ensayos en una dobladora, para determinar la eficiencia de los elementos de su máquina, y ver si eran los óptimos para obtener un doblado de calidad. Haciendo uso de la siguiente ecuación, determinaba el ángulo que se formaba entre las arrugas.

$$\alpha_w = \frac{L_w}{r_i} \quad (3.4)$$

Donde α_w es el ángulo entre dos arrugas, L_w es la distancia entre los dos picos de las arrugas y r_i el radio de curvatura aplicado en el ensayo. Es observable, en base a diferentes ensayos realizados, que para tubos de alta WF , las arrugas tienden a ser menos uniforme y estar más concentradas en una zona, esto puede deberse al alto valor de las tensiones de compresión. En cambio, al reducir el valor de WF , el arrugamiento es más uniforme y las arrugas formadas tienden a tener un mismo ángulo entre ellos.

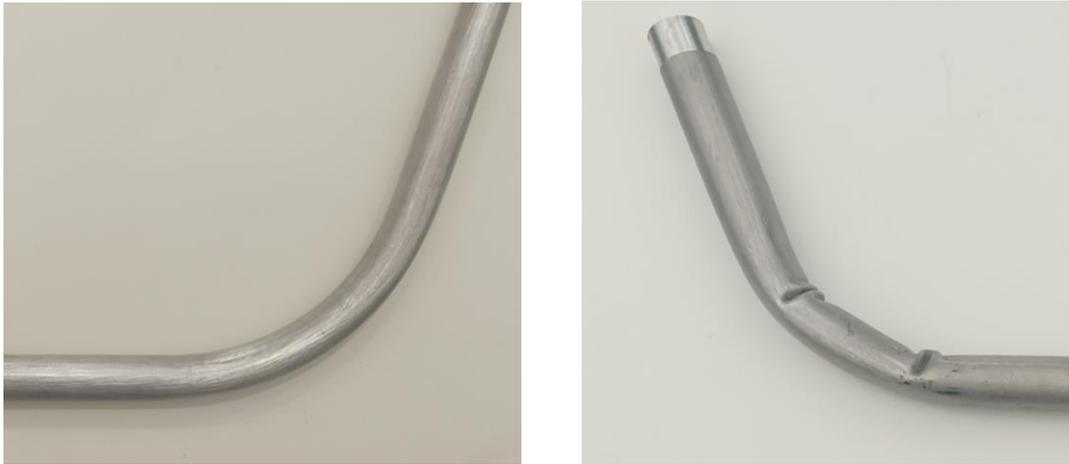


Figura 3.23: Formación de arrugas para el caso de: a) Bajos valores de WF , no se produce arrugamiento b) Altos valores de WF , se aprecia varias arrugas.

Además, Nayyar (2017) propuso que la distancia entre los picos de las arrugas formadas era aceptable si esta tenía un valor mayor o igual a 12:

$$\frac{A}{Depth} \geq 12 \quad (3.5)$$

Donde A representa la distancia entre los picos de las arrugas y $Depth$ es la profundidad de la cresta media, que se obtiene a partir de la suma del diámetro exterior de las dos crestas contiguas dividido por dos, menos el diámetro exterior del valle.

$$Depth = \frac{(OD)_1 + (OD)_3}{2} - (OD)_2 \quad (3.6)$$

Donde OD representa los diámetros exteriores de las crestas y valles, como se muestra en la siguiente figura:

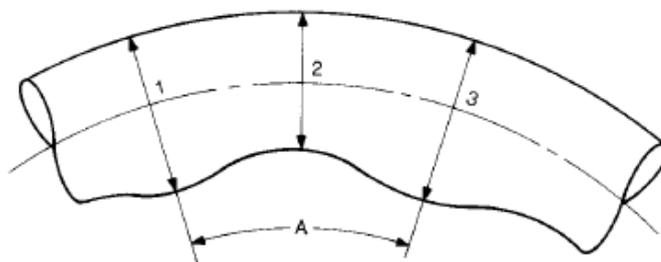


Figura 3.24: Representación de la distancia entre arrugas

- **Sección ovalada:**

Durante la operación, la zona del tubo que llega entrar en contacto con la matriz de doblado y las matrices de presión, es sometido a unas fuerzas que producen un aplastamiento a lo largo de la pieza. Este suceso, provoca que la sección circular de inicio de la pieza se transforme en una sección ovalada o elíptica, donde es apreciable como uno de los ejes de la sección se ha alargado y el otro se ha acortado.

Este defecto es independiente de factores como el WF ya que, a la vista de varios ensayos realizados, el tubo se deforma en su sección tanto para altos como bajos valores de WF . La presencia de este defecto está asociada más a el uso adecuado de rellenos o mandriles en el interior del tubo que, a través de la presión interior que ejercen hacia las paredes del tubo, permite enfrentar a las diferentes presiones a las que son sometidas.

Una forma de estimar el grado de deformación de la sección circular es mediante la siguiente ecuación

$$u(\%) = \frac{D_{m\acute{a}x} - D_{m\acute{i}n}}{D} \quad (3.7)$$

Donde u es el grado de ovalidad obtenido en el ensayo, D es el diámetro exterior de la pieza, $D_{m\acute{a}x}$ es el diámetro máximo de la sección ovalada obtenida y $D_{m\acute{i}n}$ es el diámetro mínimo de la sección. Agarwal (2006) estimó, en base a sus ensayos, que el valor del grado de ovalidad estaba en torno al 5 – 20% para ensayos donde no se usaba ningún tipo de relleno, aunque este valor puede llegar a tener un valor menor del 5% si el relleno o mandril están aplicados de manera correcta.

Cuadrado (2010) en una serie de ensayos mostró que, para diámetros de tubos por debajo de los 25,4 mm, los valores de ovalidad eran bajos y casi constantes, mientras que, para tubos con un diámetro superior al valor anterior, la deformación de la sección toma valores bastantes altos, por lo tanto, la tendencia de este fallo es exponencial respecto al diámetro exterior.

- **Aplanamiento:**

Mientras en la zona de intradós se produce arrugamiento por la acción de las fuerzas de compresión, en el extradós se produce el efecto contrario. En la zona exterior actúan fuerzas de tracción que incitan al alargamiento del tubo y al de su pared. Esto provoca que, en dicha zona, el tubo en vez de exhibir una zona curvada, se muestre una zona aplanada. El aplanamiento excesivo también está relacionado con la ovalidad, ya que cuanto más aumente el aplanamiento también se produce mayor ovalidad.

- **Fractura:**

Cuando el tubo está siendo sometido a las fuerzas de tracción en su zona exterior (extradós), como se ha comentado irá sufriendo un cierto aplanamiento en dicha zona. Si estas tensiones de tracción se exceden del valor de la resistencia a fractura del material, la pieza acabará fracturando en la zona exterior.

- **Engrosamiento y adelgazamiento:**

Las tensiones, de tracción y compresión, originadas en el proceso producen una variación en el espesor de las paredes del tubo. Las fuerzas de tracción tienden a estirar la pieza durante la operación, provocando una reducción del espesor de la pared por la zona exterior de la pieza. Mientras, las fuerzas de compresión, en la zona interior, generan un engrosamiento o aumento del espesor del tubo. Este fallo mecánico es independiente del material, es decir, ocurrirá sea cual sea el material de la pieza.

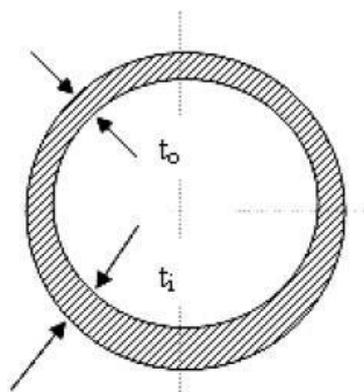


Figura 3.25: Adelgazamiento a un espesor t_0 y engrosamiento hasta un espesor t_1

La variación del espesor tanto en la zona exterior como interior de la pieza se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\psi(\%) = \frac{t_1 - t_o}{t_o} \quad (3.8)$$

Donde ψ es el porcentaje de variación del espesor de la pared en cualquier zona del tubo, t_1 (mm) es el espesor de la pared tras el doblado y t_o es el espesor inicial de la pared del tubo antes de realizar el doblado.

En trabajos como el de Cuadrado (2010) se determina que las variaciones son del 8% el adelgazamiento y del orden del 9% para el ensanchamiento del material, dando como máximo una variación del 15% a la variación del espesor de la pared.

- **Springback:**

En el proceso de doblado se busca producir un cambio permanente en la geometría de la pieza. Para ello, es necesario alcanzar la zona plástica del diagrama esfuerzo – deformación, ya que sino, por las propiedades elásticas del material de la pieza, esta tenderá a volver a su forma original. Para deformarla plásticamente es necesario superar un cierto umbral de fuerza, pero incluso superando este valor en la pieza quedan zonas elásticas que no llegan a plastificar.

Tras finalizar el proceso de doblado, al retirar la carga, debido a las propiedades elásticas del material se provoca el fenómeno de recuperación elástica o *springback*, donde la pieza vuelve parcialmente a su estado original.

Como muestra Li Heng et al. (2006) en sus ensayos para analizar el springback en tubos doblados a través de una máquina CNC, la recuperación elástica es un factor clave que afecta a la calidad del tubo ya curvado. Analizando comprobó que, si se realiza la operación a ángulos y radios de doblado grandes, mayor será la recuperación elástica, debido a que la longitud y recorrido que realiza el tubo es mayor y por tanto más superficie del material es afectada en el proceso. En cambio, una disminución del ángulo de curvado provoca menor springback.

Cuando el ángulo de doblado y el diámetro del tubo tienen un alto valor, el springback es mayor, pero reduciendo el valor del ángulo, el springback se verá reducido. Por último, teniendo en cuenta las propiedades del material, una pieza con un alto módulo de Young presenta un menor springback y, para piezas con un alto límite elástico, la recuperación elástica será mayor.

Por otro lado, Cuadrado (2010) realizó varios ensayos de flexión en tubos de diferentes materiales, para determinar la variación en los diferentes fallos mecánicos presentes. Pudo comprobar como aumenta el springback aumentando el diámetro exterior del tubo, pero era apreciable que este aumento era mínimo, es decir, la diferencia entre el springback para un tubo de diámetro pequeño y uno de diámetro grande era apenas de 1°.

También comprobó que la recuperación elástica en el acero era mucho menor que en el aluminio, ya que el acero es un material que presenta una mayor dureza y rigidez que el aluminio.

3.2.3 Equipo usado en los ensayos

La máquina dobladora de tubos se basa en una dobladora por arrastre rotativo. Consiste en una máquina proveniente de una empresa de fabricación actualmente inactiva. La máquina es de uso manual, sin ayuda de ningún tipo de energía o elemento hidráulico que facilite la operación de conformado.

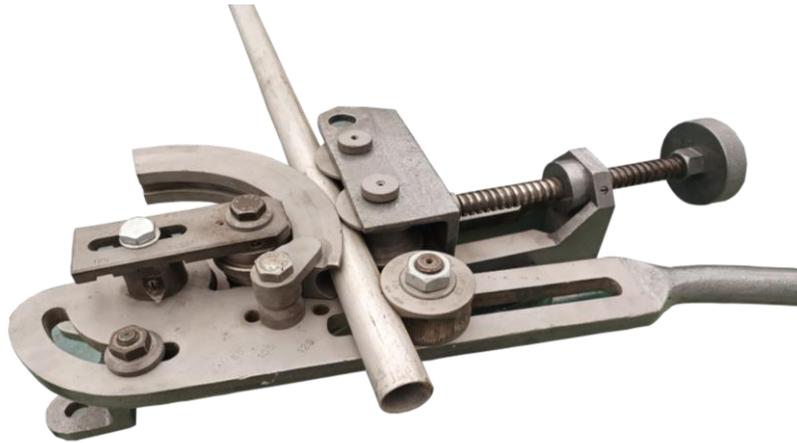


Figura 3.26: Máquina dobladora de tubos con sus diferentes elementos

La máquina permite realizar la operación para tres radios de curvatura distintos: 85, 105 y 125 mm y permite el doblado desde los cero hasta los 90 grados, pasando por intervalos de 30 grados. Además, contiene varios juegos de matrices de diferente diámetro y para los tres radios de curvatura disponibles. Para las distintas matrices disponibles, cada una de ellas se identifica con un número que conforme aumenta también lo hace el diámetro de su sección. Según esta designación, las matrices disponibles para la realización de las prácticas contienen los siguientes diámetros:

Designación de la matriz	Diámetro de la sección
N9	10,5 mm
N11	17,8 mm
N13	20,3 mm
N16	21,2 mm
N21	27,4 mm

Tabla 3.2: Matrices disponibles de la máquina dobladora de tubos

A primera vista, la máquina de doblado de tubos por arrastre rotativo presenta los siguientes elementos:

- **Matriz de doblado:**

Constituye el elemento principal de la máquina y el que contiene el radio de curvatura con el que se ejecutará la operación. Contiene una sección con la forma y diámetro del tubo que se va a conformar. Por detrás tiene una acanaladura de sección rectangular que se conecta a la máquina, y permite el giro de la matriz a lo largo del proceso.

El diseño de estas matrices requiere muchas consideraciones, desde el factor de recuperación elástica o el grado de precisión al que se quiere llegar. La selección del material para estas piezas también está influida por la producción que se quiere obtener o la capacidad del mismo equipo para conformar. Materiales como el acero suelen usarse para doblado de tubos pequeños y para producciones altas.



Figura 3.27: Matrices de doblado o conformado de la máquina dobladora

- **Matriz de presión**

Son un conjunto de matrices cuyo principal objetivo es la contención del tubo y evitar que se desplace en cualquier otra dirección. Proporcionan una presión constante durante toda la operación y contienen una serie de fijadores para poder intercambiar el juego de matrices, pudiendo así tratar con diferentes diámetros o secciones.

Además, las matrices de presión proporcionan una reducción del estrechamiento de las paredes y minimizan las marcas o desgarramientos sobre el tubo al disminuir la resistencia al avance.



Figura 3.28: Matrices de presión

- **Matriz de sujeción:**

También conocida como abrazadera, es un elemento que sujeta el tubo y trabaja en conjunto con la matriz de doblado. Al igual que las dos matrices anteriores, su sección dependerá del diámetro de la pieza. Además de ayudar a la matriz de doblado en la ejecución de la operación, consigue evitar el desplazamiento del tubo en otra dirección que no sea la de la curva de doblado. Normalmente suelen estar fabricadas de acero ya que se necesitan presiones de apriete elevadas y que la vida útil de estas piezas sea lo más longeva posible.

Una característica diferenciable y que se puede apreciar en la Figura 3.29, es el patrón estriado de diferentes secciones que contiene. La función principal de este patrón es mejorar la sujeción del tubo en el proceso, ya que si este fuera liso podría permitir algún desplazamiento de la pieza.



Figura 3.29: Mordaza o abrazadera con diferentes secciones

Para ciertas operaciones, además de los elementos presentados anteriormente, es común ver dos componentes más en el proceso. Esto se debe a que, según las propiedades geométricas y materiales del tubo, no es posible realizar un doblado de calidad e incluso, porque la resistencia que opone el tubo a ser doblado es alta y es necesario aplicarle grandes fuerzas para poder realizar el curvado. Estos dos elementos son: el mandril y la matriz deslizante.

- **Mandril:**

Es un elemento que se inserta en el interior del tubo o cualquier pieza de sección hueca. El objetivo principal del mandril es evitar los posibles defectos que aparecen en el proceso de doblado como las arrugas, el aplastamiento de las paredes del tubo o la ovalidad de la sección. Las características y el diseño de los mandriles dependen de la pieza y sus propiedades geométricas como el diámetro, el espesor de la pared o el material. Es por ello, que en el mercado se pueden encontrar mandriles de diferentes tipos de secciones y propiedades. Los tipos de mandriles más utilizados son:

- **Inserto (Plug):**

Es el tipo de mandril más sencillo y se utiliza para las operaciones de curvado menos crítica que requieran en ciertos casos el uso de un mandril. Consiste en un bloque cilíndrico donde uno de sus extremos ha sido previamente mecanizado. Todos los mandriles tienen un orificio roscado o algún tipo de dispositivo de bloqueo que permite su fijación. Este tipo de mandriles se suele colocar a entre 1,6 – 3,2 mm del punto de tangencia de la curva de doblado. De este modo permite sujetar y soportar las presiones sufridas por la pared exterior de la pieza en el punto donde se supera el límite elástico.

- **Mandril de forma (Form mandrel):**

Consiste en un perfeccionamiento del anterior mandril, con el borde exterior de su punta contorneado con el radio exterior de la pieza de trabajo. Su colocación consiste en posicionar la punta contorneada por delante del punto tangente. Esto permite soportar la pared exterior más adentro de la zona de doblado, algo que el mandril

inserto no permitía. Es frecuente diseñar este tipo de mandriles con una longitud ligeramente inferior a la mitad del diámetro exterior del tubo.

○ **Mandril de bola (Single ball):**

El mandril de bola o de una sola bola proporciona, a diferencia de los dos mandriles anteriormente mencionados, un apoyo interno tanto por delante como por detrás de la zona de doblado. Es un mandril de forma cuyo extremo contiene una única bola. Este tipo de mandril permite un mejor soporte para ayudar a evitar principalmente el aplastamiento y arrugamiento de la pieza.

Sin embargo, durante el doblado con este tipo de mandril, al estirarse las paredes exteriores del tubo, muchas veces se complica la operación de retirada del mandril, por lo que es necesario disponer de algún mecanismo de extracción. Este problema provoca que, a medida que el mandril está siendo retirado, tienda a cambiar ligeramente la curva formada alisando las zonas estiradas del tubo.

Por lo general, el cuerpo de este tipo de mandril se diseña a unos 0,13-0,18 mm por debajo del tamaño del tubo y la bola sobre unos 0,25-0,36 mm por debajo del valor del diámetro interior de la pieza.

○ **Mandril de multibola (Multi – ball):**

Consiste en una versión mejorada del mandril de bola, disponiendo este de dos o más bolas, permitiendo el mejor soporte y apoyo a la pieza en la zona de doblado con respecto a los otros tipos de mandriles mencionados. Este tipo de mandriles solo son flexibles en un único plano, por lo que, en caso de ser utilizados para operaciones de doblado en diferentes direcciones, su uso no es el más recomendado para dicha operación.

○ **Mandril – relleno de arena y agua congelada propuesto para las prácticas:**

El diseño de los mandriles implica una tarea difícil, además de un cierto coste, ya que para cada tubo se requiere de un mandril específico con el que realizar la operación de manera adecuada. Es por ello que muchas empresas optan por el uso de rellenos de arena (como usarán los alumnos para sus prácticas) o con agua u otro fluido semejante. Por ejemplo, Lazarescu y Slota (2018) muestran que aplicando agua en el interior de su pieza se aprecia una mejora en la eliminación de los defectos más comunes del proceso.

El uso tanto de arena o agua como rellenos permite a las empresas o fábricas de mecanizado ahorrar costes y tiempos de producción. Sin embargo, al igual que los mandriles, el uso de rellenos de arena debe ser controlado, para evitar una serie de problemas.

Al rellenar un tubo de arena, es conveniente primero limpiar la zona interior del tubo, para evitar cualquier residuo o inclusión que afecte en el doblado. También hay que tener en cuenta la cantidad y compactación de la arena. Una mala compactación o la introducción de una cantidad insuficiente de arena, genera durante el doblado el desplazamiento de la arena hacia los extremos de la pieza, haciendo que en la zona que está siendo sometida al doblado, la arena restante no pueda soportar las presiones ejercidas sobre la pieza, provocando un arrugamiento no tan excesivo, pero sí apreciable al tacto.

Esto a su vez, permite que en los extremos la arena desplazada se compacte mejor. Por tanto, si se realiza un doblado en ese extremo, por lo general, no será apreciable la presencia de arrugas en la zona interior.

Se puede comprobar aun así que, para ciertos tubos, concretamente los que presentan un alto valor del factor de pared WF , el uso de rellenos de arena no evita la generación de arrugas en la zona interior del tubo. Por ello, para esta situación crítica, se ha decidido optar por mejorar la compactación del relleno interior. A través de la combinación de arena y agua y el posterior congelamiento de la pieza rellena, es posible apreciar que, para el caso de tubos de un alto valor de WF , se puede eliminar al completo la presencia de arrugas y conseguir valores entre el 0,5-1% de deformación de la sección.

En la figura 3.30 se muestra un tubo de altos valores de WF doblado con dos rellenos distintos. El extremo izquierdo de la pieza se ha realizado a través de un relleno solo de arena, donde es apreciable la presencia de

arrugas en la zona curvada. En cambio, el extremo derecho ha sido conformado mediante un relleno de agua y arena y que posteriormente ha sido congelado, observando así la nula aparición de arrugas en la zona interior del tubo.



Figura 3.30: Doblado con relleno en tubos de alto *WF*

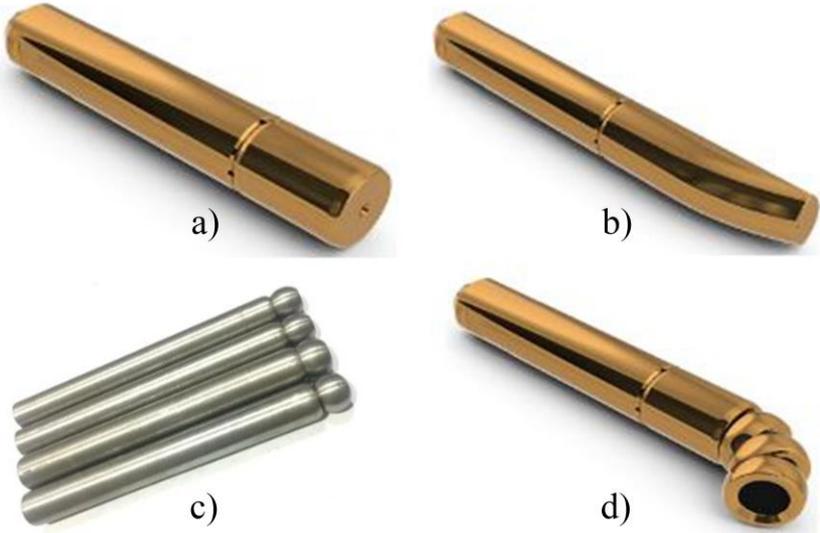


Figura 3.31: Tipos de mandriles: a) Plug Mandrel v) Form Mandrel c) Single ball d) Multi – ball

Al utilizar los mandriles en la operación de doblado, es importante tener en cuenta su posicionamiento dentro de la pieza. Además, la colocación del mandril es crucial para el doblado (Cuadrado (2010)):

- 1) Cuando el mandril se ubica demasiado lejos de la zona de flexión del tubo, dentro de esa zona las probabilidades de formación de arrugas son altas. Esto se debe a que, al no estar lo suficientemente adelantado, no genera la presión suficiente en el interior del material para soportar las fuerzas ejercidas sobre la pieza.
- 2) La colocación del mandril en una posición demasiado adelantada puede generar en la parte exterior de la curva bultos (*Bump*) o arrugas en el tubo, generalmente al final de la zona doblada. Estas deformaciones no siempre aparecerán de la misma forma y dependerán del material del tubo, la forma del mandril y el radio de curvatura. Estos bultos, son principalmente generados por el extremo del mandril al clavarse en el tubo, lejos de la zona de flexión.

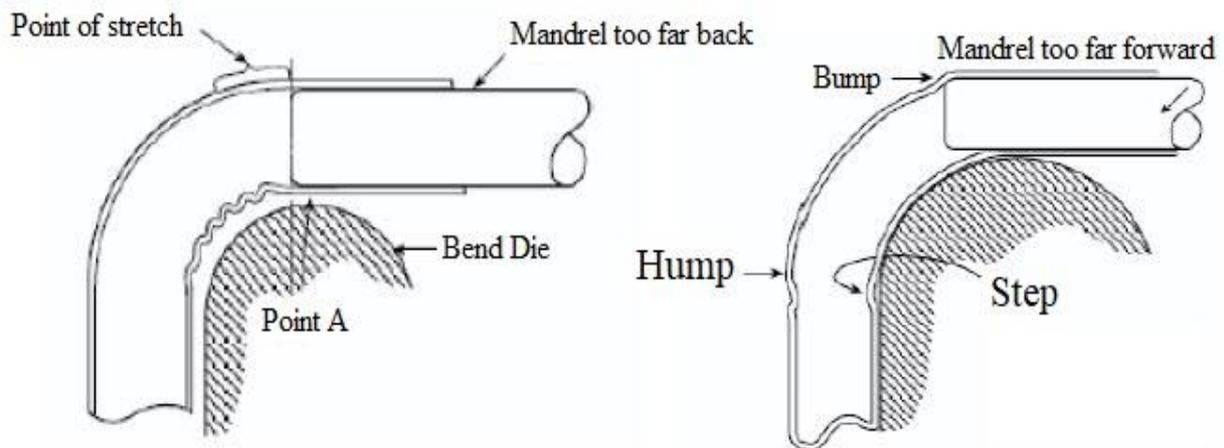


Figura 3.32: Colocación del mandril: a) Mandril demasiado alejado b) Mandril demasiado adelantado

- **Matriz deslizante**

Es una herramienta semicilíndrica de longitud variable que trabaja en conjunto con el mandril y la matriz de conformado. Su disposición más frecuente es al lado de la matriz de conformado, donde a veces incluso está adaptado para conectarse directamente a este y a lo largo de la operación permanece inmóvil, sin cambiar el desplazamiento del tubo.

El objetivo principal de este componente es evitar la aparición de arrugas cuando el tubo a conformar presenta una alta resistencia a la compresión o sus paredes son muy delgadas.

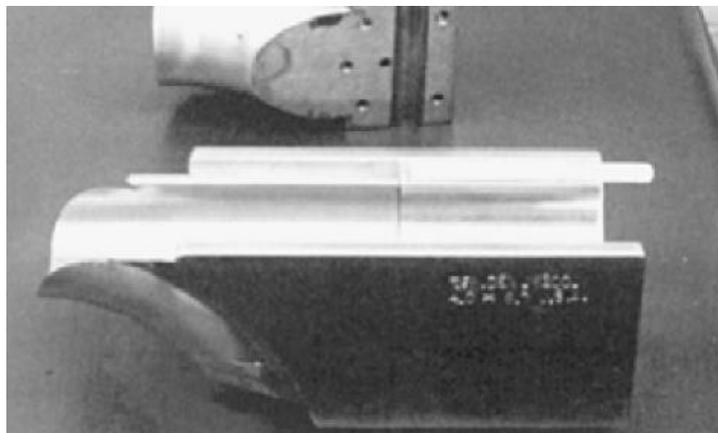


Figura 3.33: Matriz de deslizamiento

Los elementos de la máquina que se usarán para las prácticas serán los tres primeros mencionados. No se usará en ningún momento la matriz de deslizamiento, y el mandril se cambiará por rellenos de arena.

3.2.4 Descripción del proceso

Una vez descritos los principales elementos que componen la máquina dobladora, se procede a realizar un esquema de los pasos para la preparación de la máquina a la hora de realizar un ensayo de doblado. Para ello dispondremos de los elementos ya antes mencionados: la matriz de sujeción, la matriz de presión y la matriz de doblado. Además de los tubos que se desean ensayar y las herramientas como llaves para el montaje o desmonte. Los pasos por realizar son los siguientes:

1) Determinar la matriz de sujeción y de presión necesarias:

Ante la gran variedad de matrices que se disponen, será necesario ver cuál es la adecuada para realizar la operación. Elegir para un tubo de cierto diámetro unas matrices de una sección pequeña puede llevar a estropear la pieza de trabajo y, en el caso escoger una con dimensiones considerablemente grandes provocaría que los elementos de la máquina no llegarán a aplicar la presión sobre el tubo al no entrar en contacto con este.

Mediante el uso de pies de rey o galgas de radio se compara el diámetro de la sección del tubo con las matrices y así se puede escoger tanto la matriz de presión como la matriz de conformado adecuadas para el tubo a doblar.

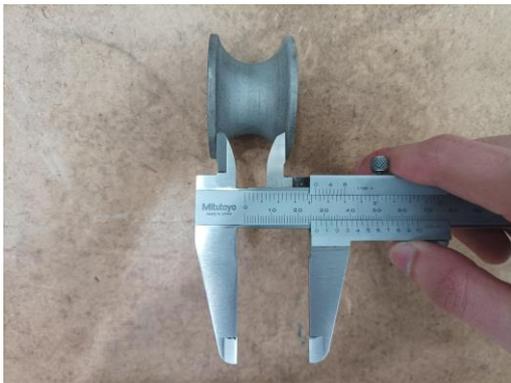


Figura 3.34: Medición de la sección de las matrices de presión a través de: a) Pie de rey b) Galgas de radio

Otra forma de comprobar que la matriz de presión o conformado es adecuada para nuestros tubos es simplemente colocando el tubo sobre alguna de las matrices, y ver que coincide su sección con la de la matriz. Aunque este proceso no sería el adecuado ni recomendado, facilita y agiliza el proceso de comprobación.



Figura 3.35: Comprobación de la matriz adecuada, mediante la colocación del tubo sobre la sección

2) Colocación de los diferentes elementos en la máquina dobladora:

Tras determinar cuáles serán las matrices apropiadas para realizar el ensayo, se procede a colocar cada una de ellas haciendo uso de llaves Allen o una llave inglesa, con la métrica adecuada, para atornillar los diferentes elementos comentados anteriormente.

Las matrices de presión por su forma disponen de dos agujeros por donde se les colocará una serie de fijadores para que estos no se desplacen durante el proceso. La colocación de este elemento se realiza en un bloque de tres agujeros disponibles que, para su desplazamiento hacia la pieza, dispone de un ajuste de avance.

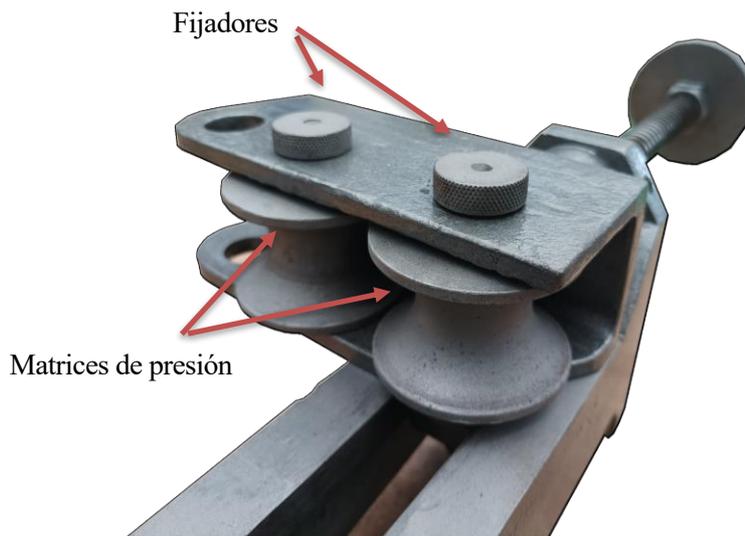


Figura 3.36: Colocación de las matrices de presión y elementos que lo componen

Por otra parte, la matriz de doblado dispone de varios elementos para su colocación. Tendrá un elemento por el cual se colocará la acanaladura para que la matriz en el proceso pueda realizar su giro, la colocación de esta se pondrá según el radio de curvatura que se quiere conseguir. Por otro lado, se dispone de un pequeño fijador que se colocará y realizará un apriete para mantener cierta parte de la matriz inmóvil. La posición del fijador también está determinada por el radio de curvatura de la operación, en el cual dispone de dos filas de tres agujeros designadas para el radio de curvatura a usar.

Acanaladura para colocación de matriz de doblado

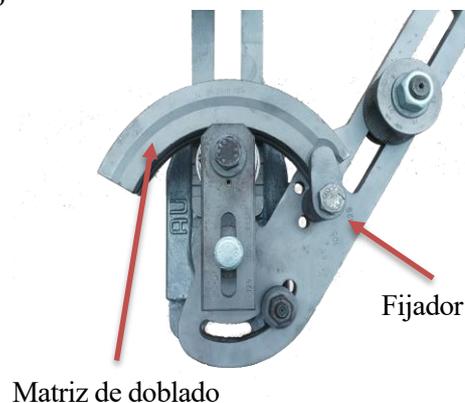
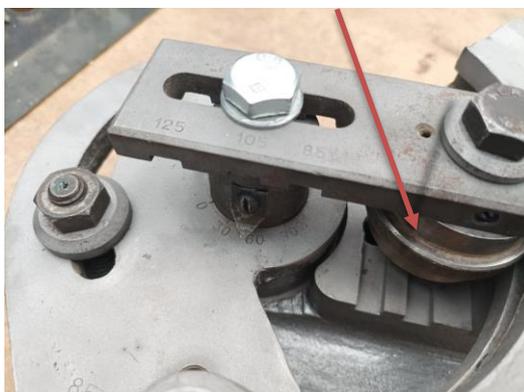


Figura 3.37: Colocación de la matriz de doblado y sus elementos correspondientes

Con todos los elementos colocados, la máquina dobladora quedará con la forma que se puede observar en la figura 3.38:

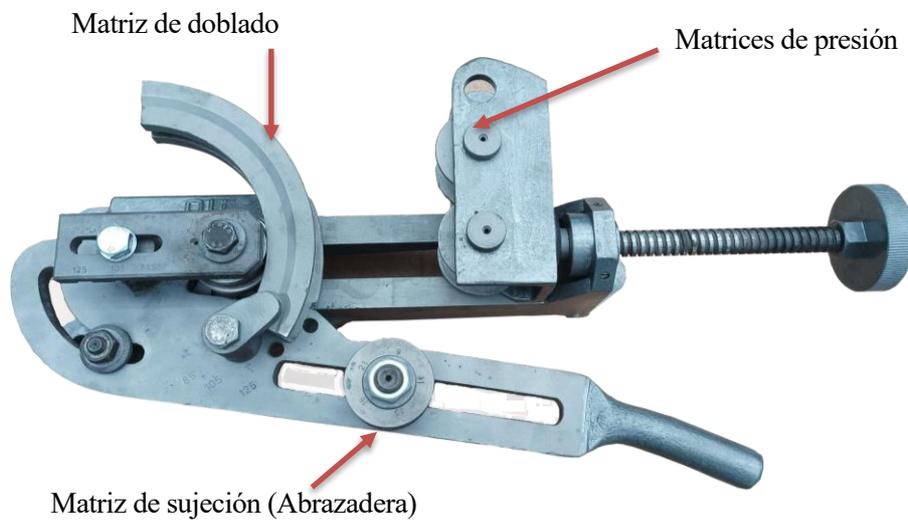


Figura 3.38: Vista en planta de la dobladora con sus diferentes elementos colocados

3) **Ensayo de doblado:**

Tras colocar todos los componentes necesarios para el ensayo, ya solo queda por insertar el tubo dentro de la máquina. Primero, el tubo se colocará en la matriz de doblado o conformado, dejando parte del extremo del tubo sin contactar con la matriz, ya que esta parte estará agarrada por la matriz de sujeción. Mientras se sujeta el tubo en dicha matriz, se irá desplazando el bloque que sujeta las matrices de presión hacia la pieza, hasta el punto de que evite el desplazamiento del tubo.

Tras esto, la matriz de sujeción se lleva hasta el extremo del tubo, colocándole con la sección estriada que le corresponda a ese diámetro. Con esto, se aprieta dicha matriz y ya se puede realizar la operación.

Para ciertos tubos, que contengan relleno o su relación WF sea muy alta, las fuerzas necesarias para doblar la pieza serán muy grandes, por ello se deberá hacer uso de un tubo auxiliar que se colocará en el brazo donde se realizará la fuerza de doblado. Con este tubo, tanto el operario como el alumno podrán realizar la operación sin ningún problema.



Figura 3.39: Introducción de tubo auxiliar para facilitar el doblado de ciertos tubos

3.2.5 Diseño de la caja para la limpieza de máquinas

Al inicio de los ensayos, era apreciable la mala apariencia estética que tenía la máquina dobladora de tubos. Tras el paso de los años, el poco uso y mantenimiento que se le ha realizado a la máquina ha provocado que en gran parte de los elementos que la constituyen, estén en un estado corrosivo y desgastado. Por ello, se decidió realizar una limpieza y pintado a la máquina, para darle una mejor apariencia de cara a las prácticas y que los alumnos pudieran apreciar de mejor manera los diferentes elementos que constituyen la máquina dobladora.

Para la limpieza de la máquina se optó por usar una pistola de chorro de arena a presión. Consiste en una pistola compuesta de dos orificios, donde una se le suministra aire a presión, y por el otro, entra arena. El aire a presión permite desplazar la arena y ser proyectada contra los elementos de la máquina, ejerciendo un efecto cortante debido a las altas velocidades con las que impacta en las piezas. Esto permite eliminar ciertas capas de suciedad o pintura corroída y crear una superficie lisa de color grisácea.

El problema del uso de este tipo de pistolas es la peligrosidad que puede provocar al operario que utilice dicha herramienta, provocando en su mayoría cortes si este no utiliza ningún tipo de EPI para su propia protección. Por esta razón, se decidió diseñar una caja de madera, que permita al operario protegerse durante la realización de la limpieza de la máquina y para las futuras que se propongan realizar.

A primera vista, la caja está constituida por un bloque principal en cuyos extremos se han colocado dos asas para facilitar su transporte y dos agujeros por donde el operario, usando guantes adecuados para su protección, pueda meter parte de su brazo para manejar tanto la pistola como la pieza. El otro elemento visible es su tapa superior, que permite ver el interior de la pieza a través de un cristal protector y así poder realizar la operación sin ningún peligro. En su parte trasera, se ha decidido dejar dos pequeñas aberturas para permitir a lo largo de la limpieza, la salida de la arena y el aire a presión.



Figura 3.40: Parte delantera de la caja para la limpieza de la máquina

En su interior, se ha instalado una lámpara que permita mejorar la visibilidad a través del cristal al operario y, tres paneles metálicos donde se colocará la pieza y también para proteger a lo largo del proceso a la caja para que esta no se deteriore.

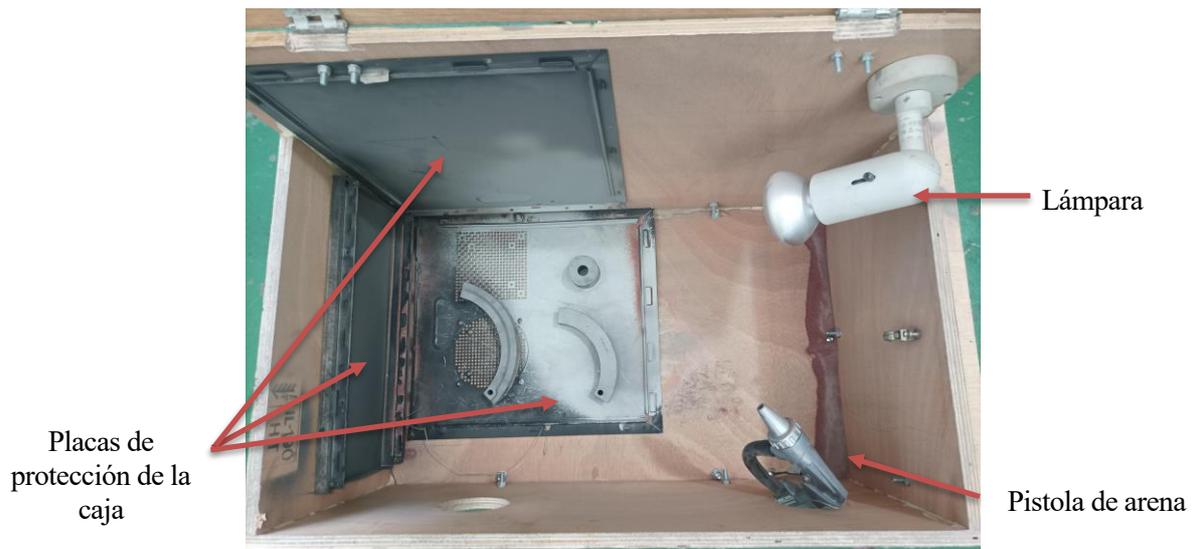


Figura 3.41: Interior de la caja para la limpieza de la máquina

En cuanto al proceso de limpieza, se ha buscado limpiar todas las piezas de la máquina, incluidas las matrices de presión, doblado y de sujeción. Para los elementos compuestos de zonas atornilladas o con cierta rosca, se les ha protegido esas zonas, mediante bolsas de plástico o bloques de corcho, para evitar que se deterioren tras la operación y dificultase después el atornillado de alguno de los conjuntos atornillados. Las piezas, tras la limpieza, adquieren una superficie lisa, libre de capas de corrosión o pintura desgastada y de un color grisáceo.



Figura 3.42: Piezas de la máquina tras el proceso de limpieza

Tras realizar la limpieza de cada una de las piezas, se procede a realizar un pintado de varios de los elementos que la conforman. Para ello, se ha tenido en cuenta una réplica disponible de la misma máquina, para tener en cuenta las piezas que anteriormente estaban cubiertas de alguna capa de pintura (en su caso verde oscuro). Se ha decidido pintar las zonas de la máquina que en la operación de doblado no contacten con la pieza de trabajo o realicen ciertos desplazamientos que puedan desgastar la pieza y su superficie tras varios ensayos realizados.



Figura 3.43: Pieza pintada con pintura plateada

El resultado final de la máquina se muestra en la figura 3.44:



Figura 3.44: Máquina dobladora de tubos limpiada y pintada

3.3 Diseño de las practicas

Explicada toda la información y teoría necesaria acerca del doblado de tubos, se procede al diseño del guion de la práctica para este proceso. El modelo de esta práctica se ha inspirado en el guion de ensayos diseñado por Guillén Pelayo (2016) en su trabajo de fin de grado para doblado de chapas. Estableciendo la misma estructura, se procede a diseñar el modelo de prácticas.

Primero, es necesario tener en cuenta ciertos puntos sobre el desarrollo de la práctica, ya que determinarán en cierta medida el contenido de la misma:

- El tiempo de realización de las prácticas y los ensayos establecidos no debe superar los 30 minutos, ya que no será la única práctica por realizar y ambas deberían realizarse en el mismo tiempo.
- Se establecerán ejercicios sencillos, fáciles y de rápida realización, que no impliquen al alumno una gran pérdida de tiempo al realizarlas.
- Los ejercicios de la práctica deberán ser realizados y entregados finalizada la sesión, por lo tanto, se descartará el uso posterior de cualquier tipo de software.
- La práctica se realizará por grupos para agilizar el tiempo de realización de la práctica y que no se generen tantas interrupciones debido a las dudas que pueda haber.

Establecidos estos puntos, se procede a explicar la estructura del guion de las prácticas. Este documento (Anexo I), se puede dividir en un marco teórico, donde se realizar un breve resumen a la teoría de doblado de tubos y como se deberá desarrollar la práctica. Más adelante, se presenta una hoja de trabajo compuesta de varias tablas a completar por los alumnos y de donde sacarán ciertas conclusiones entre los resultados obtenidos en los ensayos y la teoría explicada. Profundizando en cada parte, encontramos los siguientes apartados:

- **Introducción:** En esta parte, se realiza una breve descripción al doblado de tubos y sus objetivos.

Posteriormente, se presenta el método de doblado de tubos por arrastre rotativo, comentando alguna característica diferencial con respecto a otros métodos (como el uso de rellenos y mandriles) y también los diferentes elementos que componen la máquina con la que se realizarán los ensayos.

- **Parámetros de doblado:** Se presenta varios de los parámetros que más influyen en el desarrollo de la operación de doblado y con las que se trabajará en la práctica, como el factor de pared WF , el radio de curvatura R y el factor de viabilidad de doblado K , con sus respectivas ecuaciones.
- **Defectos de doblado:** Muestra un pequeño listado de los diferentes fallos mecánicos que ocurren en el doblado de tubos, como el arrugamiento o la ovalidad, que serán los dos defectos para analizar en la práctica, además de otros como el engrosamiento de pared o el springback. Para el defecto de ovalidad se presenta una ecuación con la que medirán la magnitud de esta.
- **Objetivos:** Breve listado donde se presenta varios puntos que el alumno debería de conseguir y desarrollar al finalizar la práctica.
- **Tareas a realizar:** Describe el paso a paso que deberán realizar los alumnos para llevar a cabo la práctica de la manera más rápida posible.
- **Material a emplear:** Pequeño listado donde se presentan cada uno de los elementos y herramientas que empleará el alumno para realizar los ensayos de doblado.

Esta parte deberá ser leída previamente por el alumno para poder realizar la práctica sin ningún problema. Tras esto, tendrá a su disposición una pequeña hoja de trabajo donde desarrollará los cálculos necesarios para realizar los ensayos. Dentro de esta hoja encontramos los siguientes ejercicios.

Ejercicio 1:

Se presenta una tabla donde el alumno partiendo de las diferentes matrices disponibles para realizar los ensayos de doblado, deberá medir para cada una de ella el diámetro de la sección de cada una a través de un pie de rey o una galga de radios. Además, a cada matriz le corresponde una serie de radios de curvatura que el alumno también deberá recopilar.

Este ejercicio será necesario para la realización del ejercicio 2 ya que deberá elegir entre todas las matrices disponibles, la más adecuada para realizar el ensayo de doblado.

Ejercicio 2:

Para esta parte, se presentan 3 tablas diferentes donde cada una corresponde a un tubo de diferentes medidas. Siguiendo el apartado de “Tareas a realizar”, el alumno deberá primero recopilar información acerca de las características geométricas (Diámetro y espesor de la pieza) del tubo, y a partir de las ecuaciones del radio de curvatura y el factor de viabilidad de doblado, comprobar si la operación a realizar será exitosa antes de proceder a realizar el ensayo. Además, al final de la práctica (Anexo) se presenta al alumno una serie de gráficas para calcular la viabilidad de doblado para cada uno de los tres tubos con los que se trabajará.

Para cada una de las tablas presentadas deberá obtener el factor de pared WF , el radio mínimo de doblado conseguido de las gráficas R_{min} , la matriz y el radio de curvatura estimado para realizar la operación R_{est} y el factor de viabilidad de doblado K . Al realizar los ensayos, deberá señalar si existe formación de arrugas en la tabla de “Arrugamiento” y calcular el porcentaje de la ovalidad u (%) a través de la ecuación 3.7.

Las dos primeras tablas presentadas en el documento requieren que el alumno realice dos ensayos para dos tubos de diferente WF sin aplicar ningún tipo de relleno o mandril en su interior. Con esto, se busca que el alumno observe la influencia del factor de pared en el ensayo, fijándose de que, al doblar dichos tubos, la pieza de una relación WF más pequeña tendrá un doblado casi perfecto con cierto aplanamiento y lo más importante, sin formación de arrugas. Por otro lado, con el tubo de mayor WF comprobará que el aumento de este valor provocará que, al ser doblado, se iniciará una formación de arrugas continua en su zona interior de manera poco excesiva, pero apreciables a simple vista.

Junto con esto, el profesor de dicha práctica puede enseñar las consecuencias de usar relleno de arena en este último tubo con alguna pieza ya conformada antes de la práctica, para que los alumnos aprecien que el uso de rellenos mejora considerablemente el doblado.

Por último, se presentará a los alumnos a realizar el problema más crítico, el doblado para tubos de una relación WF de 36. Para ello, deberán realizar dos ensayos con el mismo tubo: uno sin relleno y el segundo ensayo con un relleno de arena, agua y que posteriormente será congelado, para endurecer lo máximo posible el relleno.

Al realizar los ensayos, los alumnos se percatarán de la gravedad de realizar ensayos para este tipo de tubos sin ningún tipo de relleno. Un ejemplo que podrían ver los alumnos es el que se muestra en la figura 3.31, donde se generan dos arrugas en la zona interior del tubo y un gran aplanamiento en el extradós.

Para que no se formen estos defectos, realizarán el segundo ensayo con el relleno comentado anteriormente. Comprobarán que el doblado es perfecto, sin formación de arrugas ni aplanamiento y además no se produce apenas ovalidad, es decir, que la sección de la zona doblada es igual al diámetro inicial del tubo.

En la zona de “Anotaciones”, el alumno si lo viese oportuno, para anotar ciertas observaciones que ha podido apreciar en los ensayos realizados.

4 PLEGADO DE PLETINA

Al igual que el capítulo anterior, se desarrollará el plegado de pletinas con la misma estructura que el doblado de tubos. Se tratará desde su introducción, variantes, teoría y máquina a emplear para poder diseñar unas prácticas adecuadas.

4.1 Introducción al conformado de pletina:

Los productos fabricados con hojas metálicas están día a día en nuestros alrededores. Desde objetos de consumo como latas para bebidas o de conservación de alimentos hasta aparatos electrodomésticos o la carrocería de los vehículos. A continuación, se introducirá la evolución de los procesos de formación de pletinas y su importancia en la industria.

4.1.1 Conformado de pletina:

Las pletinas se definen como láminas de metal planas de acero u otros metales generalmente utilizados en la industria de la manufactura y fabricación o incluso de la construcción. Por lo general, los tamaños de este tipo de láminas están estandarizados, donde los más comunes suelen ser 4'x 8' o 4'x 12'. Sus medidas estandarizadas permiten que sea una buena pieza de primera mano para realizarle algún proceso de fabricación o ser utilizadas directamente para cualquier construcción.

La calidad y costo de las pletinas varían dependiendo de su composición o acabado superficial. Es normal ver este tipo de láminas con cierto recubrimiento de aceite para evitar la oxidación en sus caras externas.



Figura 4.1: Conjunto de pletinas apiladas

Por lo general, las pletinas se pueden obtener partiendo de un bloque macizo de sección rectangular y cantos planos. Los procesos más comunes para conseguir pletinas abarcan desde el corte por chorro de agua con el fin de conseguir pletinas de diferente longitud o, procesos de abrasión para obtener un acabado superficial deseado, permitiendo obtener infinidad de dimensiones con grosores constantes. Incluso pueden ser obtenidos directamente de un proceso de fundición.

Pero el proceso más utilizado para conseguir pletinas es el laminado, ya sea caliente o frío según las propiedades a obtener o el material a tratar. En el laminado en caliente, aplicando calor y presión a través de unos rodillos

especiales con el fin de moldear la pieza inicial para llegar a las medidas estandarizadas del mercado de pletinas.

En la industria, es común ver el uso de pletinas de hierro y acero debido a los múltiples usos y aplicaciones que abarcan. Las pletinas de hierro son ideales debido a su gran rigidez para soportar altas presiones, además de ser un material económico para la construcción de estructuras metálicas. Para este material, los formatos más habituales van desde los 20 x 3 hasta 200 x 20, variando el espesor de la pieza desde los 3 mm hasta los 20 mm.

Por otra parte, las pletinas de acero están sujetas diversas normas de calidad, para garantizar su durabilidad y resistencia. Una de las normas más utilizadas es la norma ASTM A36, que establece las diferentes propiedades que deben cumplir las pletinas para el uso que se vaya a aplicar.

4.1.2 Introducción a los procesos de conformado de pletina

En teoría, no existe una amplia documentación acerca de procesos específicos para el conformado de pletinas dentro de la industria. Por ello en adelante, se tratará la teoría del plegado de pletina de manera similar al doblado de chapa, desde los procesos que abarcan hasta la teoría y ecuaciones desarrolladas para el mismo.

El conformado de chapa o pletinas, de diferentes secciones o espesores, abarca un gran conjunto de procesos que permiten obtener piezas finales con características y propiedades muy concretas. Por ello es de gran importancia conocer todos estos procesos ya que son muy comunes en industrias como la aeroespacial o la automóvil. Algunos de estos procesos son:

Laminado

Proceso de deformación cuyo objetivo principal es la reducción del espesor de la pletina o chapa metálica haciendo uso de dos rodillos, colocados enfrente uno del otro, que aplican presión sobre la pieza. Mientras los rodillos giran a cierta velocidad, la pieza empieza a avanzar a través de los rodillos y a la salida de estos el espesor de la lámina se verá reducido con respecto a la inicial debido a las fuerzas de compresión ejercidas por los rodillos. Este proceso implica que un cambio en la forma del material, pero sin perder su volumen inicial.

Existen variantes de este proceso, como el laminado de perfiles. Las máquinas donde se realiza esta operación se les conoce como molinos laminadores.

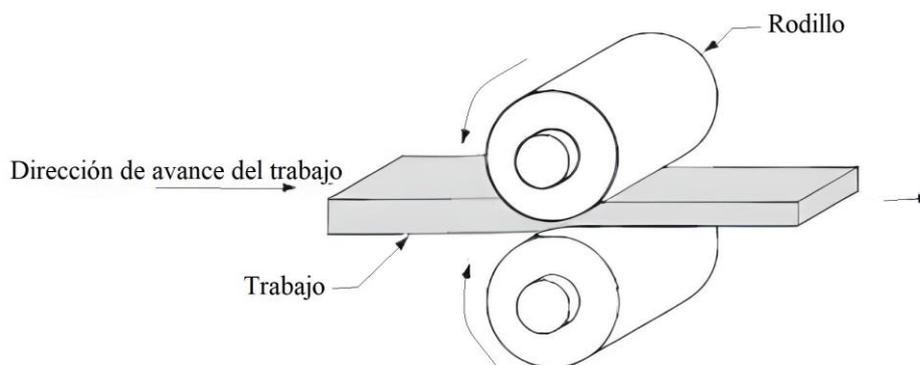


Figura 4.2: Esquema del proceso de laminado

Gran parte de la producción metálica está compuesta por la producción de chapas y láminas metálicas, sea en frío o caliente, debido al ahorro en material y reducción de costes. Estos productos fabricados confieren de buena resistencia mecánica y una excelente relación resistencia – peso.

El laminado en frío aplica reducciones menos severas debido a que requieren esfuerzos mayores y con ellos aparecen tensiones residuales en la superficie de la pieza. En frío, se obtienen mejores acabados superficiales y mejor acabado, por lo tanto, es un buen proceso para conseguir piezas de tolerancias más estrechas.

Por su parte, el laminado en caliente, se aplica para conseguir reducciones grandes de espesor e implica menos fuerza en comparación con el laminado en frío. Esto provoca, que la pieza obtenida apenas presente tensiones residuales y sus propiedades sean isotrópicas. Un problema que presenta este tipo de proceso es que, se corre el riesgo de la formación de una capa de óxido superficial en la pieza.

Como cuenta Abellán (2014) en su trabajo de fin de grado, la distribución de tensiones y evolución de las tensiones residuales dependerá en parte del contacto rodillo – pieza en el proceso. Varios estudios dejaban claro que existían dos patrones diferenciados en las distribuciones de presión. Para cuantificar ese grado de homogeneidad propusieron un parámetro H :

$$H = \frac{R}{t_0} \cdot r \quad (4.1)$$

Donde H es el parámetro del grado de homogeneidad; R es el radio del rodillo; t_0 es el espesor inicial y r es la reducción de espesor

- $H > 3$: La deformación es homogénea, la distribución de presiones presenta un máximo localizado en el punto neutro.
- $H < 3$: La deformación no es homogénea, la distribución de presiones presenta dos máximos, uno situado próximo a la entrada y otro situado próximo a la salida, haciendo que la teoría clásica del proceso no resulte aplicable y requiera de modelos numéricos.

A través de mayores estudios llega a la conclusión de que, al disminuir este grado de homogeneidad H , se produce un cambio en la distribución de presiones, llegando con ello a unas deformaciones menos homogéneas y provocando unas tensiones residuales mayores.

También comprobó en su modelo, que al hacer para el caso más crítico ($H < 3$) incluyendo un aumento de la temperatura, las tensiones residuales en la superficie disminuían de manera considerable con respecto al modelo inicial.

Doblado de pletina

Proceso de deformación plástica donde se le aplica una fuerza al material confiriéndole cierto grado de curvatura. Se aplica una fuerza de flexión sobre la pieza, generando en ella un estado de tensiones y deformaciones tanto en su zona externa como en su zona interna. Las magnitudes de estas tensiones y deformaciones dependerán de varios factores, como el material de la pieza o el radio de doblado aplicado. El objetivo principal de este proceso es la obtención de piezas con cierto curvatura y radio antes de proceder a ser mecanizados.

Las máquinas, donde se realizan este tipo de operaciones, son conocidas como prensas de dobladora o plegadoras. Estas máquinas constan principalmente de dos elementos: el punzón, el cual aplica una fuerza sobre la pletina o lámina metálica; y la matriz donde se apoya y sujeta la pieza en el proceso.

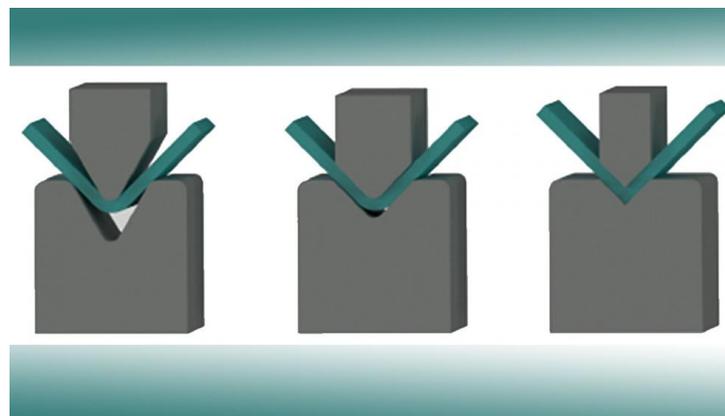


Figura 4.3: Proceso de doblado de pletina

4.2 Plegado de pletinas

Como se ha comentado con anterioridad, la teoría del plegado de pletinas será semejante a la teoría elemental del doblado de chapa, viendo las diferencias en los ensayos experimentales. Por ello, a veces trataremos el plegado como “doblado” aunque el término no sea el mismo.

Al igual que el doblado de tubos, el plegado o doblado de pletina presenta una variedad de métodos y una teoría acerca del comportamiento de las chapas o pletinas metálicas, en la que se puede analizar los fallos mecánicos producidos a causa de los diferentes parámetros que actúan en la operación.

4.2.1 Variantes del proceso del doblado de pletinas

En las últimas décadas se han ido desarrollando nuevas técnicas para conseguir doblar perfiles metálicos, como las chapas o pletinas. Todas estas se pueden diferenciar por factores apreciables a simple vista: el radio de doblado aplicado, la forma del punzón o el uso de ciertos elementos para realizar la operación. Entre los procesos de doblado más importantes y usados en la industria podemos encontrar:

Doblado al aire (Air bending):

El plegado por aire es una técnica de doblado que empezó a utilizarse por la década de los 70 y tiene un gran parecido con el proceso de doblado en V, que se verá a continuación, por la forma de su punzón, pero con ciertas diferencias. Consiste en un punzón y una matriz inferior (de uso opcional) con una apertura en forma de V. Al presionar el punzón sobre la pieza, se generan tres puntos de contacto: uno entre el punzón y la propia pieza y dos puntos de contactos similares a cada lado de la matriz y la pieza.

En el doblado al aire no presiona la pletina hasta el fondo de la matriz, ya que la profundidad lo único que determina es el ángulo de curvatura.

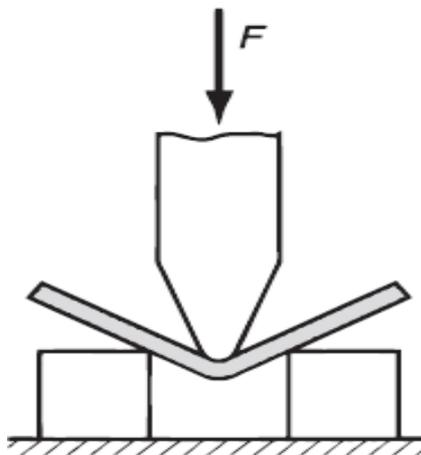


Figura 4.4: Proceso de doblado al aire

Es un proceso flexible, ya que permite el doblado de una gran variedad de espesores y no necesita de un utillaje específico, por lo que ahorra en costes, para realizar diferentes ángulos de plegado y radios de curvatura. Es mucho más rápido de realizar que otros procesos, requiere menor fuerza de plegado y provoca daños leves en la superficie de la chapa por el poco contacto entre el punzón y la chapa. Aunque, no es recomendable su uso si se buscan ángulos de plegado muy precisos y acarrea problemas de compensación del springback (recuperación elástica de la pieza a su estado original).

Doblado en V (V Die):

Consiste en un punzón que avanza de manera descendente hacia una chapa apoyada en un troquel, cuya principal característica es su forma en V. El punzón incide sobre la lámina, hasta que esta empieza a conformarse con la matriz. Es un proceso bastante común en la industria, ya que permite tratar doblados de alta precisión y no requiere de máquinas de grandes capacidades de fuerza para realizar los ensayos.

Los ángulos pueden variar desde los agudos hasta los obtusos, pero es más frecuente ver trabajar con los primeros. Además de su alta precisión, permite eliminar efectos muy típicos del doblado de chapa, como es el springback. Aunque, para conseguir trabajar con piezas que requieran grandes fuerzas de doblado, es necesario el uso de máquinas de grandes fuerzas de presión y de utillajes más caros.

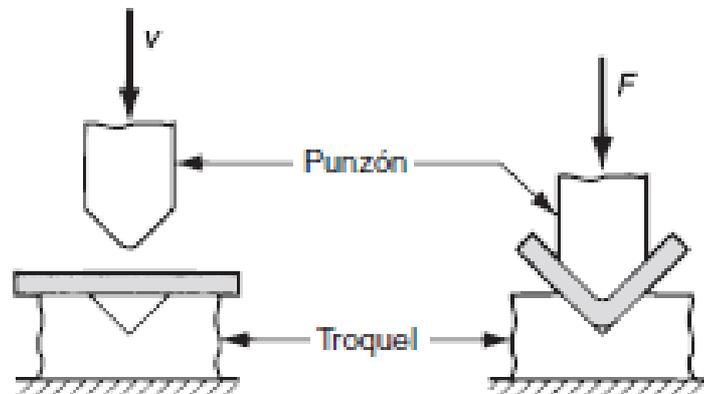
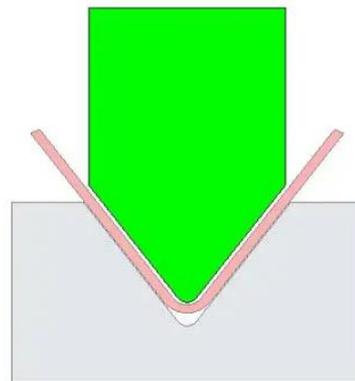


Figura 4.5: Doblado de chapa en V

Dentro de este método, es posible encontrar dos estilos que siguen la misma metodología, pero presentan entre ellos ciertas diferencias. Estos dos métodos son el doblado a fondo (*Bottoming*) o acuñación (*Coining*):



Bottoming

Figura 4.6: Métodos de Bottoming

Bottoming:

Conocido también como plegado a fondo, es un proceso similar al plegado al aire, pero con la diferencia de que en este método el contacto entre la pieza, el punzón y la matriz es mucho mayor, siendo este en gran parte de sus superficies. Debido a esto, este método permite obtener piezas con una mayor precisión respecto a la anterior operación. Además, requiere una fuerza de doblado menor con respecto al plegado al aire y permite reducir la recuperación elástica de la pieza en gran medida.

El elemento diferencial de este método de doblado es su punzón en forma de V. Aunque, existen otros métodos que realizan la misma operación, pero variando la geometría del punzón utilizado para conseguir curvados con formas específicas. El doblado en canal (*Channel bending*) utiliza un punzón y una matriz o troquel en forma de canal para conformar la pieza. El doblado en U (*U bending*) se destaca por como dice su nombre, por su punzón en forma de U de curvatura perfecta.

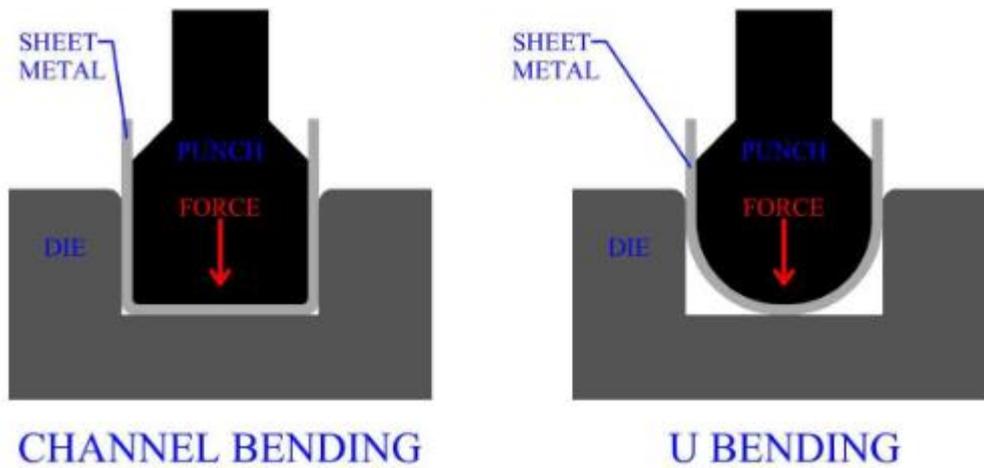


Figura 4.7: Doblado en canal y Doblado en U

Corrugado (Offset bending):

Es un tipo especial de doblado donde se da forma a la chapa mediante un patrón simétrico a lo ancho de esta. El objetivo principal de este proceso es la obtención de pieza más rígidas y resistentes, permitiendo su gran uso para aplicaciones estructurales en el sector de la construcción.

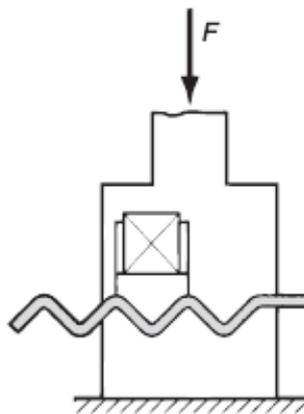


Figura 4.8: Proceso de corrugado

Tanto el punzón como la matriz tienen la forma del patrón simétrico que se le aplicará a la pieza.

Doblado rotativo:

Este método de doblado, a diferencia de otros procesos, utiliza un punzón con un diseño particular. El punzón consiste en un cilindro, con cierta porción dimensionado con el ángulo de doblado deseado, que en la mayoría de los casos coincide con la forma de la matriz de sujeción (*Die*). El movimiento que realiza el cilindro es simplemente rotatorio, por lo que estará firmemente limitado para realizar otros desplazamientos. A diferencia de otros métodos que se verán más tarde (*Doblado de dado deslizante*), en este método no es necesario el uso de una matriz de presión para fijar la pieza durante el ensayo, ya que la fuerza que ejerce dicho elemento en este caso será ejercida por el propio punzón.

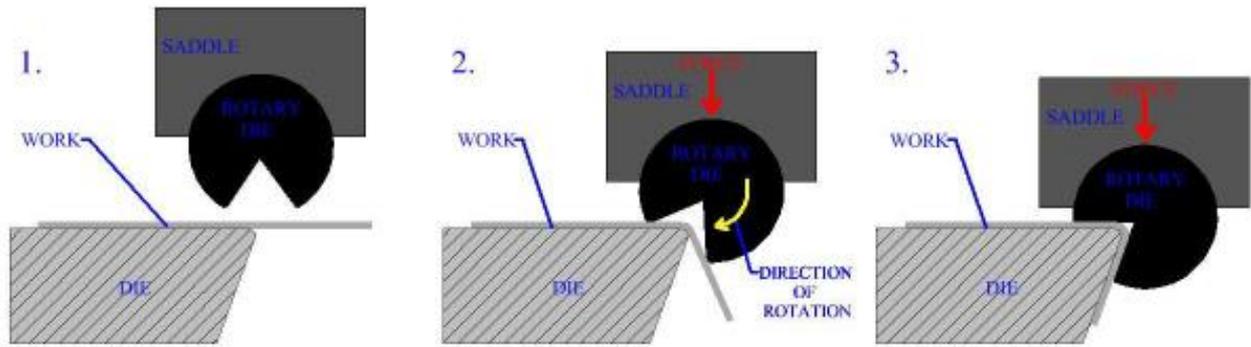


Figura 4.9: Proceso de doblado rotativo de chapa

La porción recortada del punzón cilíndrico se puede dimensionar para ángulos menores y mayores de 90 grados, permitiendo realizar doblados tanto para ángulos de doblado agudos y obtusos.

Este método ofrece grandes ventajas con respecto a otros métodos, ya sea por la eliminación del uso de la matriz de presión o su capacidad de conformar a diferentes ángulos. Este proceso es relativamente nuevo y está ganando popularidad en la industria manufacturera.

Doblado de dado deslizante o en voladizo:

También conocido como “doblado de bordes”, la pieza se apoya en un troquel o matriz de sujeción que contiene el radio de doblado que se le aplicará a la pieza. Después la matriz se sujeta firmemente a través de una placa de presión, para evitar cualquier desplazamiento, y tras esto, un punzón desciende, a una cierta velocidad v , aplicando una fuerza F sobre la lámina haciendo que se conforme alrededor de la matriz para que obtenga la curvatura y radio de la matriz.

Este tipo de doblado está diseñado para realizar plegados de 90° o menores, aunque se pueden encontrar modelos que permitan conformar a ángulos mayores de 90°, pero su diseño es complejo. Es un proceso usado sobre todo para producciones de gran volumen, pero todo ello requiere de un alto coste de producción.

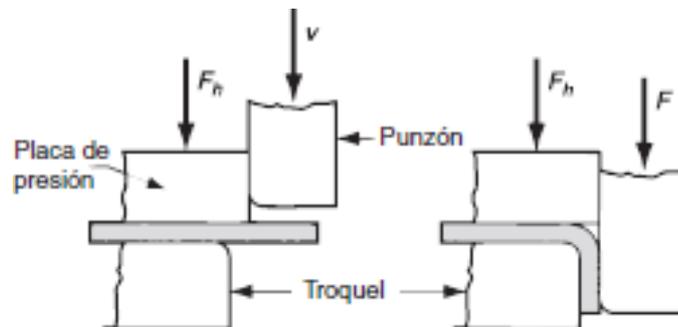


Figura 4.10: Doblado en voladizo o doblado de bordes

Existen otras operaciones de doblado donde involucran el doblado sobre ejes curvos en lugar de ejes rectos, o tienen otras características que se diferencian de los anteriores métodos:

- **Conformado de bridas:** Operación donde el filo de la lámina de metal se dobla en un ángulo de 90° para formar un borde. Permite reforzar o dar rigidez a la pieza metálica y es un proceso el cual puede involucrar ciertos estiramientos o contracciones del metal.
- **Doblez:** Implica el doblado del borde de la lámina sobre sí misma en más de un paso de doblado, generando una pieza con un radio interior nulo. Se usa particularmente para eliminar bordes agudos de la pieza, aumentar la rigidez y mejorar su apariencia.

- **Engargolado:** Operación donde se ensamblan dos bordes de láminas metálicas.
- **Rebordeado:** Conocido también como conformado de molduras, es un proceso donde los bordes se producen en forma de rollo. Se realiza con fines de seguridad, resistencia y estética.

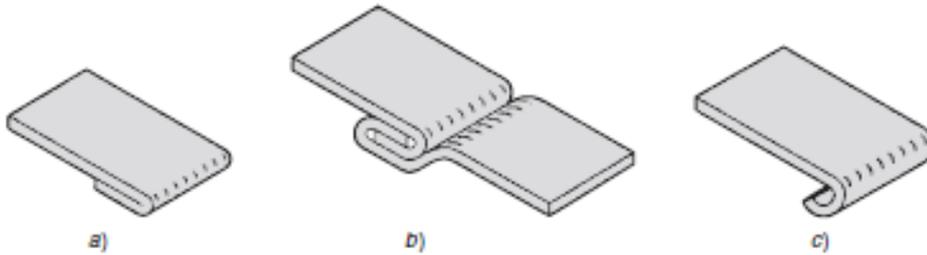


Figura 4.11: a) Doble b) Engargolado c) Rebordeado

A continuación, se muestra una tabla con las diferentes características de varios de los métodos de doblado de chapa mencionados.

	Ángulos de doblado	Precisión	Coste de operación	Flexibilidad de operación
Doblado en V	Amplio	Baja	Bajo	Alta
Corrugado	-	Baja	Bajo	Baja
Doblado al aire	Amplio	Baja	Bajo	Alta
Doblado rotativo	Amplio	Alta	Bajo	Alta
Doblado por dado deslizante	Limitado ($< 90^\circ$)	Alta	Alto	Baja

Tabla 4.1: Tabla de las características de los diferentes métodos de doblado de chapa

Para el diseño de esta práctica se utilizará una máquina dobladora por dado deslizante manual que permite el doblado de perfiles metálicos de sección rectangular de varios espesores.

4.2.2 Teoría del plegado de pletina

El objetivo principal de la operación de doblado es, partiendo de una pletina o perfil metálico de espesor t y ancho w , conferir a la pieza de trabajo una cierta curvatura, definida por el radio de doblado R y el ángulo de doblado θ . En la Figura 4.12, se muestra una pletina doblada con varias de sus características más destacadas.

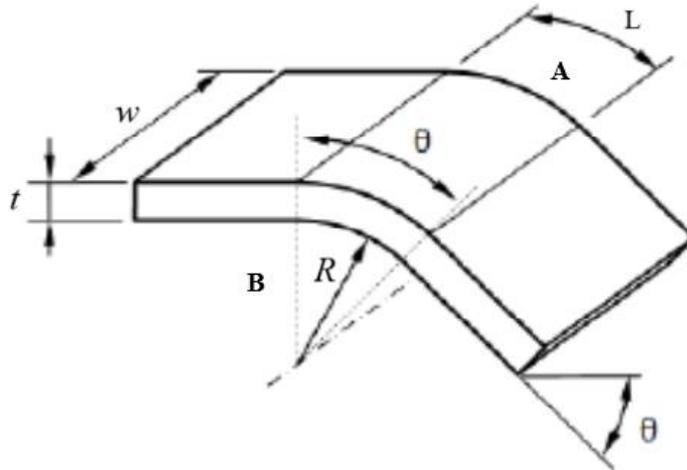


Figura 4.12: Representación de una pletina doblada

Para el estudio del comportamiento de la pieza se asumirá que las únicas tensiones generadas son las tensiones longitudinales, por lo tanto, las tensiones transversales serán despreciables y se supondrá que la operación realizada es aplicando un momento de flexión puro, es decir, sin la aplicación adicional de fuerzas de tracción o compresión sobre la pieza.

Durante la operación, en base a lo mencionado anteriormente, la pieza estará sometida a un momento de flexión puro, el cual producirá sobre la pieza una serie de deformaciones plásticas, que permitirán a la pieza adoptar una zona curvada. Además, generará un estado de tensiones de tracción – compresión, a través de su espesor. Este estado de tensiones, como también se vio en el doblado de tubos, no se comporta igual según la zona que se estudie. Por ello, la pletina conformada se puede dividir en dos zonas, como se muestra en la figura 4.12:

- **Zona A:** Cara exterior de la pletina, donde sus fibras experimentan tensiones de tracción, provocando un estiramiento en ellas a lo largo de su espesor.
- **Zona B:** Cara interior de la pletina, zona donde las fibras sufren tensiones de compresión y sufriendo un acortamiento de estas.

Además de las dos zonas mencionadas, si se decide estudiar en profundidad a lo largo del espesor, se puede encontrar varias superficies con unas características que permiten analizar más en detalle el comportamiento de la pieza. Observando la figura 4.13, se puede apreciar varios radios que definen las superficies más destacables de la pletina doblada.

Por un lado, R_i y R_o definen el radio interior y exterior de la pieza, respectivamente. La superficie definida por el radio R_m , corresponde a la superficie o línea media, la cual está siempre posicionada en la mitad del espesor de la pieza. Los otros radios, R_g y R_{m0} , definen la línea neutra (LN) y la superficie indeformada de la pletina, respectivamente.

La línea neutra, se define como la línea o superficie que separa las fibras sometidas a tracción y compresión de la pieza, por lo que, la deformación de dicha zona es totalmente nula. Por lo general, en las operaciones de doblado, la línea neutra tiende a desplazarse hacia el radio interior, causando que el radio exterior sufra grandes deformaciones plásticas con respecto al radio interior. Esto último, demuestra que la línea neutra es una buena herramienta para comprender el comportamiento en la operación. Por otro lado, la superficie indeformada se define como la superficie cuya deformación longitudinal es nula y coincide con la longitud inicial, antes del proceso.

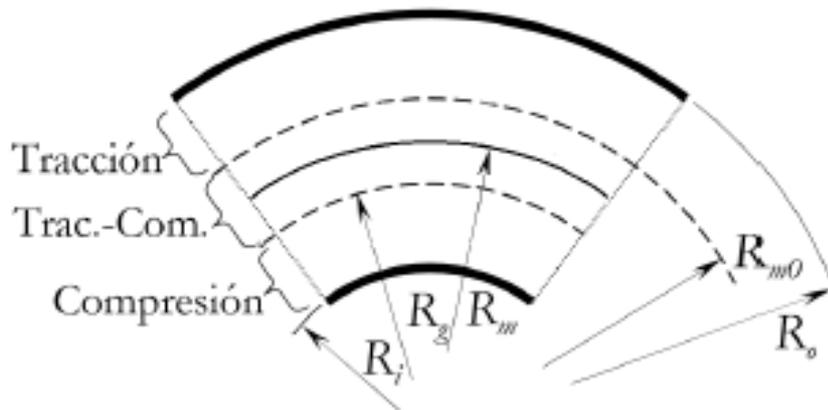


Figura 4.13: Radios de las fibras, línea neutra y línea indeformada.

Además de las zonas de tracción y compresión, existe una tercera zona, más compleja de analizar en la pieza. Delimitada entre la superficie indeformada y la línea neutra, hay una zona que, al empezar la operación predominan las compresión en ella y que posteriormente evolucionará a la tracción, creando lo que se conoce como efecto de Bauschinger, donde al deformar un metal en una dirección, hasta que ha sobrepasado su límite de elasticidad, y deformándolo después en la dirección contraria, su límite de proporcionalidad varía (valor de la tensión por debajo del cual en esta última dirección es menor).

Posición de la línea neutra:

En relación con lo mencionado anteriormente sobre la línea neutra, se ha comentado que, es una buena herramienta para entender el comportamiento que ha tenido la pieza a lo largo del proceso.

Al estar sometido tanto a fuerzas de tracción y compresión, la línea neutra, por lo general en este tipo de operaciones, se desplaza hacia el radio interior de la pieza. Su posición, a lo largo del espesor, dependerá de numerosos factores, como lo son el espesor de la pieza, el radio de doblado, el material de la pletina o el tipo de herramientas utilizado.

Escribano y Abascal (2015), proponen varios métodos sencillos para calcular la posición de la línea neutra, tomando como zona de referencia inicial el radio interior de la pletina. Estos métodos dependen exclusivamente del radio de doblado R y el espesor de la pieza T , por lo que se deben considerar como aproximaciones y no como cálculos exactos, ya que como se dijo, la posición de la línea neutra depende también de factores como las propiedades del material de la pieza o la geometría de las herramientas empleadas en la operación.

Método 1:

Conocido el cociente entre el radio de doblado y el espesor del material, R/T , y partiendo de los datos proporcionados de la tabla 4.2, obtenemos el factor ψ .

R/T	0,2	0,5	1	2	3	4	5	10
ψ	0,347	0,387	0,421	0,451	0,465	0,470	0,478	0,487

Tabla 4.2: Tabla de valores del factor ψ

Sacado el valor del factor se procede a multiplicarlo por el espesor para sacar la posición de la línea neutra:

$$X_{LN} = \psi \cdot T \quad (4.2)$$

Con este método, cuanto mayor sea la relación R/T el valor de la constante ψ se irá volviendo constante. Por tanto, para valores de R/T pequeños, hay mayor tendencia a que el resultado difiera con respecto a los siguientes métodos.

Método 2:

Otro método recomendable es la aplicación de la siguiente ecuación. Normalmente esta expresión se utiliza para el cálculo de la longitud de la línea neutra de una pieza doblada.

$$X_{LN} = \frac{T}{3} \sqrt[4]{\frac{R}{T}} \quad (4.3)$$

donde T es el espesor de la pieza (mm) y R el radio de doblado aplicado (mm).

Método 3:

La posición de la línea neutra, utilizando radios de doblado pequeños, para este caso estará definida por la siguiente expresión:

$$\rho = R_i + \lambda T \quad (4.4)$$

El valor del factor λ dependerá de los valores del radio de doblado y el espesor de la pared, que se muestran en la siguiente tabla:

R/T	λ
$R/T \leq 0,2$	0,33
$0,2 \leq R/T \leq 4$	0,42
$R/T > 4$	0,50

Tabla 4.3: Valores del factor λ

Para el último caso es apreciable que la línea neutra puede llegar a coincidir con la línea media de la pletina, ya que la relación R/T ha aumentado considerablemente y, visto desde un punto experimental, implica que la pletina no llega a deformarse excesivamente.

Método 4:

Siendo más técnicos, que con el método 3, el cual presenta algunos fallos en los valores, la empresa Artizono (2024) presentó una serie de valores del factor λ , que dependían al igual que en el método 3, de los valores de la relación radio-espesor (R/T). A través de esta tabla, se puede apreciar que una disminución de la relación R/T provoca una disminución más intensa y un mayor desplazamiento de la línea neutra hacia el interior de la pletina. A continuación, se muestra alguno de los valores proporcionados:

<i>Relación R/T</i>	λ
0,1	0,21
0,4	0,24
0,8	0,30
1	0,31
1,5	0,36
2,5	0,4
5	0,46
7,5	0,50

Tabla 4.4: Valores de λ según el valor de R/T

Con estos valores, es posible crear una gráfica donde se pueda encontrar valores intermedios con mayor detalle:

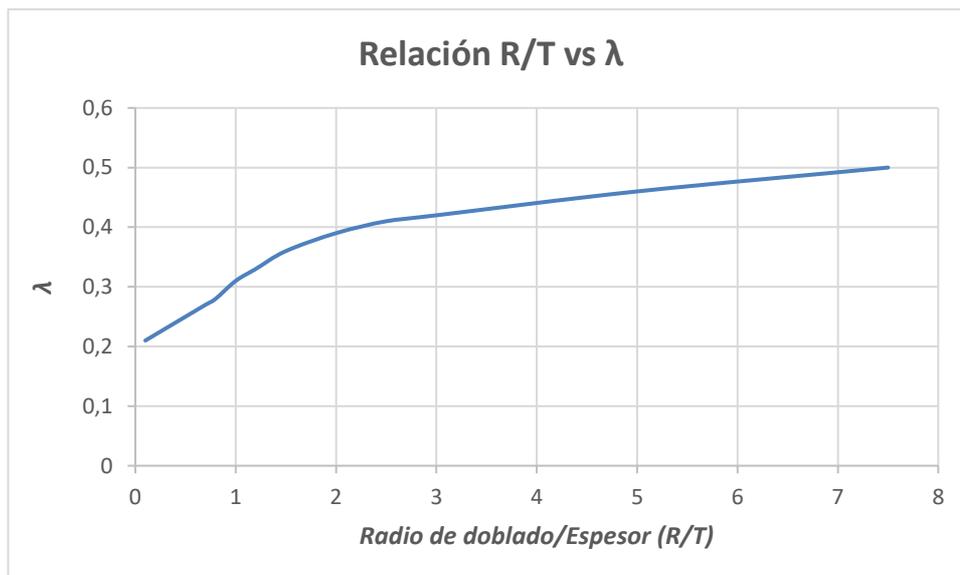


Figura 4.14: Gráfica $R/T - \lambda$

Para obtener el desplazamiento de la línea neutra solo se requiere de hacer una operación:

$$X_{LN} = \lambda \cdot T \quad (4.5)$$

Donde T (mm) es el espesor de la pieza.

Ensayo de flexión – tracción:

Relacionado con lo anterior, para evitar el desplazamiento de la línea neutra hacia el interior de la pletina, es necesario invertir el comportamiento de la pieza, para que esta se aleje lo máximo posible del radio interior y no aumente la probabilidad de agrietamiento.

Es por ello, que es necesario aplicar a la pieza fuerzas de tracción, para que la línea neutra tienda a moverse hacia su cara exterior. Anteriormente, se ha supuesto que la operación era de flexión pura, sin realizar fuerzas adicionales de tracción o compresión sobre ella. Para evitar el problema, ya mencionado, los profesionales optan por realizar un ensayo a flexión – tracción.

En este ensayo, también conocido como ensayo de flexotracción, implica el uso de fuerzas de tracción a una pieza que está siendo sometida a deformaciones de flexión. Su uso en la fabricación o en campos como la biomecánica son importantes, ya que permiten mejorar la resistencia y vida útil de los materiales.

Tensiones generadas:

Mediante la combinación de esfuerzos axiales y flectores generados sobre la pieza, la distribución de las tensiones longitudinales formadas sobre la pieza puede presentar tres patrones diferentes:

- Distribución de tensiones elástica (E), donde toda la sección de la barra está en estado elástico
- Distribución de tensiones plástica primaria (P_I), donde existe una plastificación parcial por encima de la línea neutra.
- Distribución de tensiones plástica secundaria (P_{II}), donde se produce plastificación a ambos lados de la línea neutra, quedando una zona elástica en el interior de la barra.

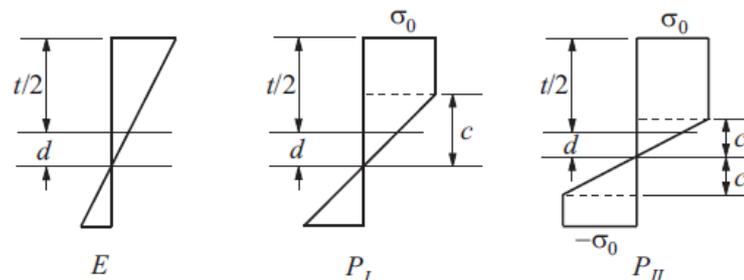


Figura 4.15: Patrones de distribución de tensiones en el espesor: Elástico (E), plástico primario (P_I) y plástico secundario (P_{II})

Observando la figura 4.14, se muestran las tensiones σ_o y $-\sigma_o$ que representan las tensiones de tracción y compresión, respectivamente. El espesor de la pieza es t y d es la distancia de la línea neutra a la superficie media de la pieza. Por lo general, la evolución en ensayos de doblado a flexión pura la secuencia de patrones será $E - P_I - P_{II}$.

Tensiones residuales:

Las tensiones residuales consisten en una serie de tensiones internas que existen en la pieza, incluso tras dejar de someterla a una carga externa. Surgen, principalmente, cuando la pieza ha sido sometida a una tensión superior al límite elástico y se produce una deformación plástica, por lo que, estas tensiones están muy relacionadas con el efecto de recuperación elástica.

También, el origen de estas tensiones se debe en gran parte a los procesos de fabricación, anteriores a los que estuvo sometida la pieza antes del conformado, como la fundición, mecanizado o ciertos tratamientos térmicos.

Estas tensiones pueden ser tanto perjudiciales como beneficiosas, dependiendo de si la tensión es de compresión o tracción. Las tensiones residuales de tracción, si son lo suficientemente grandes, pueden provocar la distorsión o agrietamiento de la superficie. Si a esto, le sumamos las tensiones de tracción que se aplican sobre la pieza, puede provocar una gran reducción de la fiabilidad de la pieza. En cambio, las tensiones residuales de compresión reducen los efectos de las tensiones de tracción aplicadas, contribuyendo así a mejorar la resistencia a la fatiga y al agrietamiento.

La medición y evaluación de estas tensiones suele ser un proceso complejo. Aunque con el tiempo, se han ido desarrollando nuevas técnicas y dispositivos que permiten conseguir con mayor precisión los valores de estas tensiones. Algunas de estas técnicas son la difracción de rayos X o la difracción de neutrones.

Parámetros de plegado:

A la hora de ejecutar el plegado de la pletina, es necesario diseñar y ajustar las herramientas en base a los parámetros del proceso. En la figura 4.15 se muestran los parámetros más influyentes del plegado de pletina, tras realizar la operación:

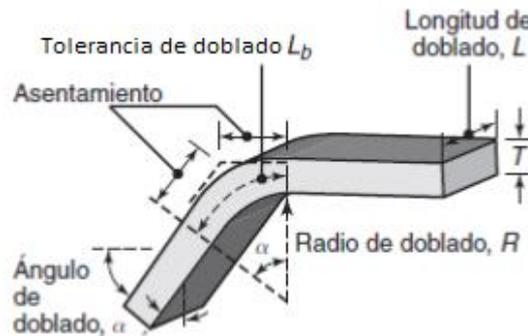


Figura 4.16: Parámetros de doblado en pletina conformada

Mencionando varios defectos que ocurren en la pieza, se presentan los parámetros o variables más influyentes en el resultado de la pieza final de trabajo obtenida:

- **Radio mínimo de doblado:**

Es el menor radio de doblado por el cual no aparecen grietas en la superficie exterior de la pieza, la aplicación de un radio de un valor menor a este generaría grietas. Está relacionado con el espesor de la pieza y la reducción de tensión de área. Este parámetro es uno de los más influyentes del proceso, ya que un aumento o disminución de su valor implica resultados muy variados en la superficie de la pieza. El uso de radios de doblado de pequeño valor con respecto al espesor de la pieza implica una reducción de área de tensión alta, y por lo tanto un aumento de la probabilidad de formación de grietas en la pieza.

$$R_{\min} = T \left(\frac{1 - \lambda}{r} - 1 \right) \quad (4.6)$$

Donde R_{\min} es el radio de doblado mínimo, T es el espesor de la pletina y r es la reducción de tensión del área de la pletina y λ es un factor obtenido de la Tabla 4.3, que dependerá del radio de doblado y el espesor de la pieza. La reducción de tensión del área r es una medida de la ductilidad del material, es decir, una medida de la deformación plástica que sufre el material antes de romperse, que se puede expresar con la siguiente expresión:

$$r(\%) = \frac{A_o - A_f}{A_o} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Donde A_o y A_f son las áreas transversales inicial y final (a la fractura) de la pieza. Observando la figura 4.17, para el caso en el que se ha supuesto $\lambda = 40$, se puede ver que es posible analizar gráficamente la evolución de la reducción de tensión de área r con respecto a la relación del radio de doblado R y el espesor de la pieza T . Es apreciable que, la disminución del radio de doblado, manteniendo el espesor de la pletina constante, provoca un aumento de la reducción de tensión de área.

Para que una pletina pueda plegarse sobre sí misma (dobladillo) sin que aparezcan grietas, el material debe tener una r en el ensayo de tracción menor del 67% (esto sería para el caso donde el radio de doblado $R = 0$ y $\lambda = 0,33$).

Se puede mejorar la facilidad de plegado del material aumentando r , ya sea por calentamiento o doblándolo en un ambiente de alta presión.

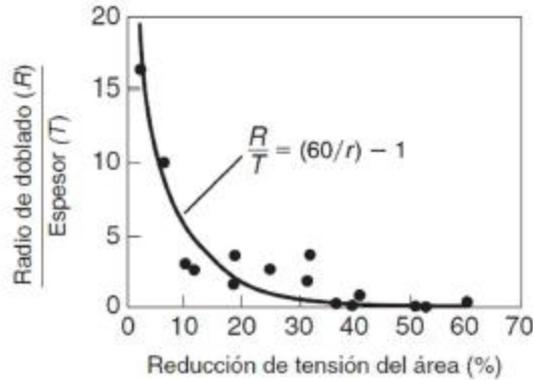


Figura 4.17: Relación R/T y la reducción de tensión de área r

Para ciertos materiales, es posible determinar un rango de valores para el radio mínimo de doblado. Como muestra Kalpakjian (2008), en la siguiente tabla:

Materiales	Blando	Duro
Aleaciones de aluminio	0	$6T$
Cobre berilio	0	$4T$
Latón	0	$2T$
Magnesio	$5T$	$13T$
Acero inoxidable austenítico	$0,5T$	$6T$
Titanio	$0,7T$	$3T$
Aleaciones de titanio	$2,6T$	$4T$

Tabla 4.5: Radios mínimos de doblado para ciertos metales a temperatura ambiente

- **Tolerancia de doblado**

Es un parámetro que permite conocer la longitud del eje neutro de la pletina, para poder estimar la magnitud del estiramiento de las fibras de la pieza. En el caso de utilizar radios de doblado pequeños con respecto al espesor de la pletina, el estiramiento será considerable. Este valor solo se puede determinar tras el doblado, ya que antes de realizar la operación es complicado conocer la longitud del eje neutro. La ecuación que permite determinar la longitud del eje neutro es la siguiente:

$$L_b = \alpha (R + kT) \quad (4.8)$$

Donde R es el radio de doblado aplicado (mm), T es el espesor de la pletina (mm) y α es el ángulo de doblado de la pieza. Dependerá también de la constante k , cuyo valor está definido según la relación entre el radio de doblado y el espesor de la pletina: 0,33 (para $R/T < 2$) o 0,5 (para $R/T > 2$). Para el caso que se considere que el

eje neutro se encuentra en el centro del espesor de la hoja, se tomará un valor del factor de $k = 0,5$.

Como se puede observar, el término $(R + kT)$ es el mismo término que el mostrado en la ecuación 4.4, para hallar la posición de la línea neutra. Simplificando la ecuación 4.9, podemos obtener:

$$L_i = \alpha R < L_b \quad (4.9)$$

$$L_e = \alpha (R + T) > L_b \quad (4.10)$$

Donde L_i y L_e corresponden a las longitudes de las superficies interior y exterior de la pletina, respectivamente.

Por otra parte, la deformación de las fibras tanto exterior como interiores de la pieza se puede aproximar con la siguiente expresión:

$$e = \frac{1}{\left(\frac{2R}{T}\right) - 1} \quad (4.11)$$

Como se puede observar en la ecuación, si la relación R/T disminuye, esto provoca un aumento de las deformaciones de las fibras interiores y exteriores y una mayor probabilidad de generarse grietas en la zona exterior de la pieza y, en casos más perjudiciales, la fractura.

- **Material:**

El trabajo con materiales con un alto módulo de elasticidad E , es decir, de mayor rigidez, implica realizar los doblados con un mayor esfuerzo respecto a otros con un E menor. Otros factores como la ductilidad del material también son importantes, ya que los materiales más dúctiles permiten un conformado más eficaz que un material frágil, ya que estos últimos tienden rápidamente a la fractura de la pieza. Muchas de estas propiedades se obtienen de manera experimental a través de ensayos previos de tracción, compresión, etc.

- **Ángulo de doblado:**

Denominado como α , es el ángulo de doblez deseado a obtener en la pieza final conformada. Calcular un ángulo óptimo no es una tarea sencilla, ya que están involucradas otra serie de factores más determinantes e influyentes en el resultado final de la pieza, y el ángulo de doblado es un parámetro más relacionado con el esfuerzo necesario para realizar la operación.

Un aumento o disminución del ángulo de doblado influye, sobre todo, como se ha dicho anteriormente, en la fuerza de doblado, aunque matemáticamente como se verá más tarde, no aparece en su expresión. Al realizar la operación con ángulos pequeños, como 30 grados, el momento de flexión necesario para conformar la pieza es bajo, ya que el recorrido que debe realizar el punzón es mucho menor y también, menor es la superficie que deberá recorrer de la pieza. En cambio, si se realizan doblados a valores de ángulos altos, como a 90 grados, la flexión requerida para doblar la pieza es mucho mayor y el recorrido del punzón también.

Como se ha dicho, a mayor ángulo de doblado el punzón deberá realizar mayor recorrido, por tanto, la pieza tiende a traccionar mucho más tiempo en el proceso, provocando que la línea neutra se desplace más hacia el interior de la pieza y con ello se genere un mayor agrietamiento.

- **Holgura:**

Es la abertura o espacio que existe entre la matriz de presión y el punzón de la pieza, para el caso de doblado por dado deslizante. Como muestra Galisteo (2018) en los ensayos de su memoria, la holgura tiene una gran influencia en la pieza de trabajo.

Cuanto mayor sea la holgura, mayor será el momento de flexión aplicado sobre la pieza, ya que la distancia entre

el punto de contacto y el dado deslizante será mucho mayor. Para el caso de trabajar con una pieza del mismo material y ángulo de doblado, pero variando el valor de la holgura, es fácil apreciar cómo, cuanto más aumentaba el valor de la holgura, el agrietamiento era más crítico y en algunos casos, se producía la fractura.

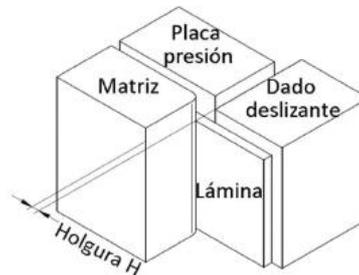


Figura 4.18: Holgura entre la matriz y el dado deslizante (punzón)

- **Fuerza de doblado:**

Es la carga o esfuerzo necesaria, que aplica el punzón sobre la pieza, para conseguir el radio de curvatura y ángulo de doblado deseados. La magnitud de esta fuerza dependerá de factores de la pieza como su espesor, ancho o material, además de la forma del punzón o herramientas utilizadas en el proceso. Kalpakjian y Schmid (2008) en su libro, estimaron una ecuación simple y global para determinar la fuerza necesaria para doblar una viga rectangular ideal, según cada tipo doblado:

$$F = \frac{kYLT^2}{w} \quad (4.12)$$

Donde Y es el esfuerzo de fluencia del material, L la longitud de doblado, T es el espesor de la pieza y w es la holgura. El factor k de la ecuación, es un factor cuyo valor dependerá del tipo de doblado que se esté realizando.

Tipo de doblado	K
Doblado en V	1,33
Doblado en U	0,70
Doblado de bordes	0,33

Tabla 4.6: Valor del factor k según el tipo de doblado

En otros procesos como el doblado en V, se tienen en cuenta el avance del punzón. Este avance aumentará de cero hasta un cierto valor, para posteriormente disminuir tras acabar el conformado.

- **Dirección de laminación:**

Tras la realización de sus respectivos tratamientos térmicos, los granos de la pieza adquieren una orientación particular. Si el plegado se realiza en dirección del grano (dirección longitudinal), permite realizar una menor flexión para conformar la pieza. Aunque, por la posición ya estirada de los granos, realizar el doblado en esa dirección provoca que los granos se extiendan aún más, hasta el punto de manifestarse como una fractura en su radio exterior. Por esto, una forma de minimizar el daño al doblar en la misma dirección que los granos es, dentro de otros muchos factores, realizar la operación con un radio mínimo de doblado más alto.

En cambio, realizar el doblado de manera perpendicular a la dirección de los granos (dirección transversal),

implica una mayor fuerza de plegado para conformar la pieza, pero la probabilidad de agrietamiento y fractura en la pieza se reducirá considerablemente, y permitirá trabajar con radios de doblado mucho más pequeños.



Figura 4.19: Formación de grietas según la dirección de doblado respecto la dirección de los granos

Defectos del plegado:

Dependiendo de los parámetros ya mencionados, las chapas metálicas tienden a formar irregularidades en su superficie, afectando tanto a la calidad como a la vida útil de la pieza. Los más usuales en el proceso de doblado son:

- **Agrietamiento:**

El agrietamiento depende de factores como el tamaño de los granos y su forma. En cuanto al tamaño, si los granos son pequeños, la pieza metálica será más fuerte y rígida a sufrir grietas, a diferencia de un material con granos gruesos, que disminuye la rigidez del material. Según la forma de los granos, se pueden encontrar como puntiagudas o globulares. Los primeros son más alargadas y contienen mayores tensiones locales, por lo que son más perjudiciales. En cambio, si los granos son globulares, presentan menos tensiones y son óptimos para evitar daños en la superficie.

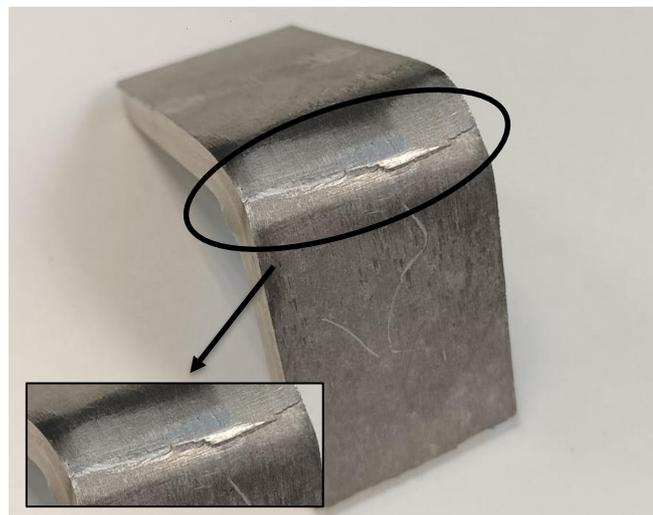


Figura 4.20: Pletina plegada agrietada

- **Fractura:**

Según las características del material, este puede tener una fractura frágil o dúctil. Los materiales frágiles tienden a una iniciación y propagación de las grietas hasta llegar a la fractura, sin antes presentar deformaciones en su superficie.

En cambio, los materiales dúctiles, exhiben deformaciones plásticas hasta llegar a la fractura, siendo un comportamiento muy frecuente en el conformado de chapa. Como comenta Morales (2010) en su tesis, la

fractura dúctil se puede producir generalmente por dos sucesos:

- Fractura por cortante: Producida en procesos de grandes esfuerzos de compresión
- Fractura por nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos: Predominante en procesos de tracción.

Existen muchos criterios para determinar la fractura dúctil de una chapa. Varios de estos criterios se basan principalmente en parámetros macroscópicos, como lo son las tensiones y deformaciones provocadas. Dichos criterios se pueden agrupar en el grupo de “criterios locales”. En cambio, existen otros criterios, que se basan principalmente en parámetros microscópicos como son el proceso de iniciación, crecimiento y coalescencia de huecos. Este grupo de criterios se puede clasificar en el grupo de “criterios integrales”.

- **Criterios locales:** Este tipo de criterios asumen que la fractura dúctil del metal depende un estado de tensiones y deformaciones en el material y que su evolución dependerá de un proceso de daño acumulado. Uno de los más destacados es el criterio de Tresca, que establece que la fractura dúctil se cumple cuando:

$$\frac{\tau_{m\acute{a}x}}{C_1} = 1 \quad (4.13)$$

Donde C_1 es una constante del material y $\tau_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo cortante máximo.

Otro criterio que se destaca en su tesis es el criterio de Bressan y Williams. Este criterio establece que el fallo se inicia en un plano en el espesor de la chapa en el cual el material alcanza un alargamiento nulo. Asume que el fallo se inicia cuando el cortante en este plano alcanza valores críticos:

$$\frac{\tau_{(d\varepsilon=0)}}{C_2} = 1 \quad (4.14)$$

Donde C_2 es una constante del material.

Por otro lado, un criterio conocido vasado en la microestructura es el de desarrollado por Oyane en 1980, donde establecía un modelo de fractura dúctil suponiendo que durante la fase de crecimiento de huecos el material se comporta como un medio poroso. Al aumentar el tamaño de los huecos durante el conformado, la densidad relativa del material (ρ , definida como la relación entre la densidad aparente del material poroso y la densidad del material considerado como libre de poros) se reduce y aumenta la deformación volumétrica hasta un valor ε_f^v :

$$C_9 = \int_0^{\varepsilon_f^v} f^2 \rho^{2C_{10}-1} d\varepsilon^v \quad (4.15)$$

Donde f es una función de ρ .

- **Springback:**

Como bien se ha comentado en el doblado de tubos, la recuperación elástica o también conocida como *springback*, consiste en un fallo mecánico donde la pieza, debido a las propiedades elásticas de su material, tras retirar la carga ejercida por el punzón o en este caso el dado deslizante, esta tenderá a recuperar parte de su forma original.

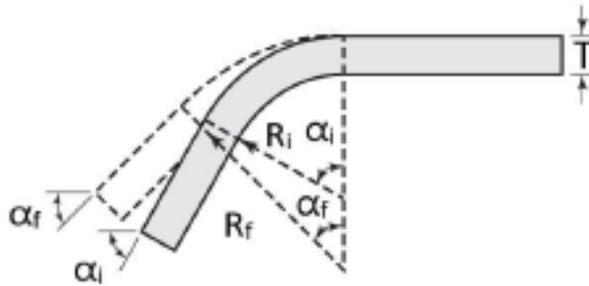


Figura 4.21: Esquema del suceso de springback en el doblado de chapa

Kalpakjian y Schmid (2008) introducen en su libro una expresión de Gardiner para el cálculo final de doblado tras retirar la carga que depende de diferentes parámetros geométricos y mecánicos:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{ET} \right) + 1 \quad (4.16)$$

A través de esta expresión, es apreciable ver que el aumento de la relación R_i/T , del límite de elástico Y o una reducción del módulo de Young E de la pieza provocan un aumento de la recuperación elástica.

Teniendo en cuenta la expresión 4.8 y la figura 4.20, es posible llegar a una relación que dependa de los ángulos de doblado.

$$L_{bi} = \alpha_i R_i = L_{bf} = \alpha_f R_f \quad (4.17)$$

$$\alpha_f = \frac{\alpha_i R_i}{R_f} \quad (4.18)$$

Donde α_i y α_f son los ángulos inicial y final de doblado tras retirar la carga, respectivamente, y R_i y R_f los radios inicial y final de doblado, respectivamente.

Otra expresión descrita por Vidal (2013) en su trabajo de fin de grado, permite conseguir la relación entre los radios R_i y R_f a través de diversos parámetros relativos a las propiedades del material como el coeficiente K (*constante de Hollomon*) y el exponente de endurecimiento por deformación n o E' que es el módulo de Young del material debido a la hipótesis de deformación plana del material.

$$\left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_f} \right) = \frac{48K}{\sqrt{3}T^2 E'} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}R_i} \right)^n \cdot \frac{\left(\frac{T}{2} \right)^{n+2}}{n+2} \quad (4.19)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (4.20)$$

Para esta expresión se supone que el material que el material se endurece por deformación, siendo este comportamiento descrito por la ecuación de Hollomon.

Formas de evitar el springback:

Estos métodos sirven tanto para el doblado de tubos como el doblado de chapas, pero es más común aplicarlos para este último proceso.

- Sobredoblado de la pieza a un ángulo mayor deseado, plegando la pieza más de lo requerido, haciendo que, al producirse la recuperación elástica, la chapa llegue hasta el ángulo deseado.

- Fondeado: Deformar plásticamente el material en la región de doblado mediante la aplicación de fuerzas localizadas adicionales de compresión entre el punzón y la matriz. Esto provoca una mayor plastificación en toda la pieza, reduciendo la recuperación elástica.
- Estirado: Mientras se pliega el material, el material es sujeta en sus extremos, siendo sometida a varias fuerzas de tracción. Esta tracción al material permite plastificar parte de las zonas elásticas que permanecen tras el doblado, reduciendo así el springback. Para este método es necesario tener un control preciso de las fuerzas de tracción aplicadas, ya que un exceso de estas puede llegar a provocar que el material fracture.
- Regolpear la pieza en la matriz original o con utillajes especiales reduciendo la recuperación elástica hasta un nivel más bajo.
- Realizar la operación de doblado a temperaturas elevadas, provocando la disminución de la tensión de fluencia del material de la pieza.
- Realizar un doblado doble, doblando el extremo dos veces con un juego de matriz reducido.

- **Hendiduras:**

Consiste en una serie de irregularidades o pliegues en la superficie interior de la pieza, en la zona que está en contacto con la matriz de sujeción. Son caracterizados por tener una deformación localizada, manifestándose como un surco que crea una pequeña discontinuidad en la pieza.

La resistencia a la formación de hendiduras se puede mejorar incrementando el espesor de la chapa o su esfuerzo de fluencia. Si trabajamos con materiales de gran rigidez y alto valor de módulo elástico E , es probable que se formen hendiduras en la superficie de la pieza.

4.2.3 Presentación de la máquina DISMA TRIS

La máquina utilizada para los ensayos y prácticas de doblado de chapa consiste en una máquina de doblado de dado deslizante, con la peculiaridad de que, a diferencia del mencionado en el apartado 4.2.1, la matriz deslizante realiza un movimiento giratorio alrededor del centro de giro de la máquina, en vez de realizar un desplazamiento recto hacia la pieza.

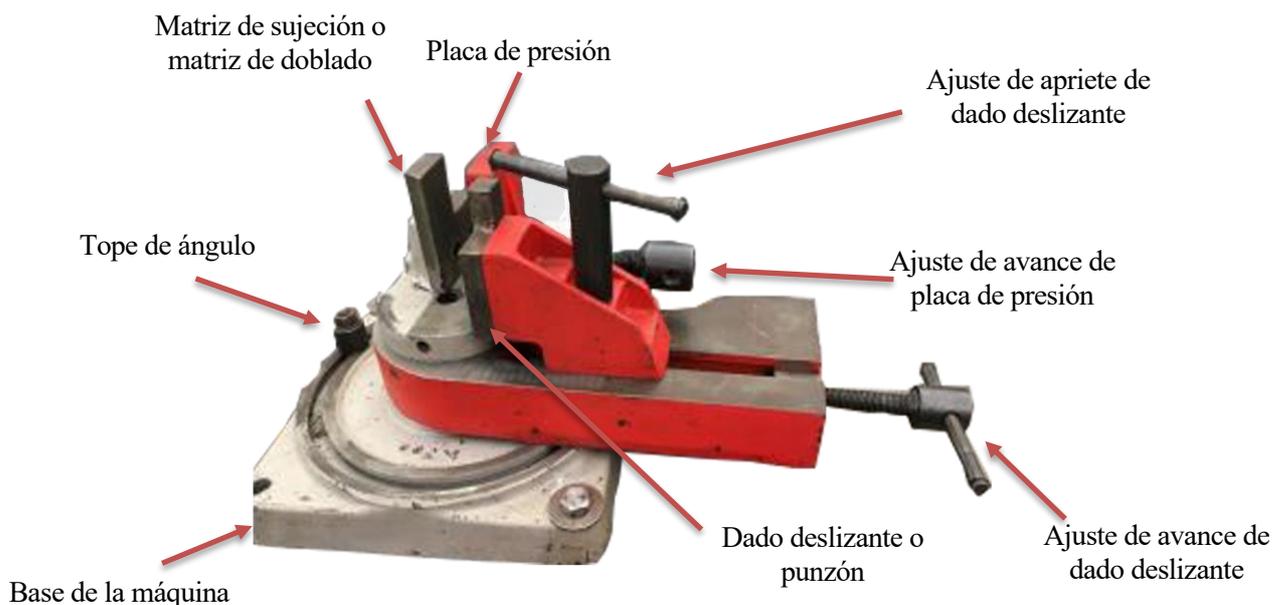


Figura 4.22: Máquina doblado de bordes DISMA TRIS

La máquina, a primera vista, no presenta un set de matrices ni utillajes con el que realizar ensayos a diferentes radios de doblado y holguras. La máquina solo presenta una matriz de sujeción, con un radio de doblado de 3 mm diseñada de tal forma que la única holgura con la que se puede trabajar es a 0 mm.

Relacionando los elementos de una máquina de doblado por dado deslizante con los que dispone la máquina de ensayo, podemos apreciar las siguientes piezas:

Dado deslizante o punzón:

Elemento de la máquina que ejercerá la presión necesaria para conformar la pieza. A diferencia de los modelos básicos, el punzón en esta máquina realizar un movimiento de giro alrededor del centro que marca la base de la máquina. Su posición queda determinada por dos ajustes: uno de avance, que permite desplazar el dado hasta la cara libre de la pieza, y un ajuste de apriete, que permite fijar la posición del componente e impedir su desplazamiento en otra dirección.

Matriz de doblado o matriz de sujeción:

Pieza utilizada como soporte de una de las caras de la pieza de trabajo. Además, contiene el radio de doblado que se aplicará a la chapa en la operación. Dicha matriz contiene dos tornillos instalados para mantenerlo firme, o para ser cambiado por otra matriz de distinto radio. Es el único elemento de la máquina que permanece inmóvil, es decir, que no tiene ningún un ajuste de avance para cambiar su posición.

Placa de presión:

Tras colocar la pieza en la matriz de doblado, este elemento ejerce sobre gran parte de la cara libre de la pieza una fuerza de presión que impide el desplazamiento de la chapa mientras está siendo conformada. Al igual que el dado deslizante, la placa de presión contiene un ajuste de avance que permite desplazarlo para hacer contacto con la pieza.

Además de estos elementos, hay que destacar la base de la pieza, donde se puede observar el pasaje circular, por donde el dado deslizante realizará su movimiento giratorio en el conformado de la pieza. Dentro de este pasaje, se ubica el tope de ángulo, que nos permite definir el ángulo de doblado a conseguir en la pieza. Por otra parte, al lado del ajuste de avance del dado deslizante, hay un orificio que permite la colocación de una barra auxiliar, que facilita el conformado de chapas metálicas más resistentes.

4.2.4 Puesta a punto de la máquina

Presentada la máquina, se establece una serie de pasos para la preparación de esta, antes de realizar la operación de doblado:

- 1) ***Colocación de los elementos:*** Primero se procede a la colocación del tope de ángulo, la matriz de doblado o sujeción y de las placas de holgura. Tras esto, se coloca la chapa o pieza metálica, posicionándola en la matriz, dejando parte de ella fuera de cualquier apoyo. Esta fracción de la pieza será la que se conformará por el dado deslizante.



Figura 4.23: Colocación del tope de ángulo

- 2) ***Ajuste de posicionamiento de elementos:*** Tanto el dado deslizante como la matriz de presión son desplazadas, a través de sus ajustes de avance correspondientes hasta contactar con la pieza.



Figura 4.24: Disposición de los diferentes elementos antes de la operación

- 3) ***Conformado de la pieza:*** Apoyando en alguna de las barras de ajuste, se realiza el giro del dado, provocando el doblado. En caso de imposibilidad de conformar la pieza por su alta resistencia, será necesaria la colocación de una barra auxiliar.

4.3 Diseño de la práctica

Para el diseño de las prácticas de plegado de pletina, se ha desarrollado un guión al igual que se hizo para la práctica de doblado de tubos. Para esta práctica, se buscará que los alumnos entiendan los dos conceptos claves: la influencia del radio de doblado en la severidad del plegado y; el desplazamiento de la línea neutra en el proceso.

Para ello dispondrán de varias pletinas de diferente material y propiedades geométricas, con el fin de que tras realizar el conformado, se aprecien las diferencias entre una y otra en relación con los defectos producidos.

Recopilación de datos:

Antes de la realización de los ensayos, el alumno deberá familiarizarse con las piezas con las que va a trabajar. Para ello recopilará información esencial para su estudio, que permitan tras realizar los ensayos, sacar conclusiones relacionadas con estos datos.

Por ello, el alumno deberá rellenar la tabla con los valores del módulo de Young E , el espesor de la pieza t , el límite elástico del material de la pieza σ_e y la reducción de área r , que será dada por el profesor que imparta dicha práctica.

Ejercicio 1:

Tras recopilar suficiente información acerca de las propiedades de las pletinas, se procederá al ensayo de plegado.

Primero, a partir de la ecuación 4.6 mostrada anteriormente, se calculará el radio mínimo de doblado necesario R_{\min} . Para hacer uso de esta ecuación, será necesario suponer que la posición de la línea neutra se ubica en el plano medio de la pletina, es decir, a la mitad de su espesor ($\lambda = 50$). Con estos valores, se estima un radio de doblado R_{est} , con el cual se trabajará.

Para este caso, al disponer solo de una matriz de doblado de $R = 3 \text{ mm}$, se optará por un ensayo que involucre a las dos pletinas, es decir, se hará un plegado simultáneo. Para ello, se colocarán las dos pletinas, una encima de la otra, por lo que, la pletina más cerca de la matriz de doblado, se plegará al radio de $R_1 = 3 \text{ mm}$, mientras que la pletina más alejada de la matriz de doblado se doblará a un radio de doblado de $R_2 = (t_1 + 3) \text{ mm}$, siendo t_1 el espesor de la pletina que se pliegue al radio más pequeño.

Una vez determinado a que radios de doblado se realizará el ensayo, se procede a colocar las pletinas como se ha explicado anteriormente en el apartado 4.2.4. Tras el ensayo, se anotará si una de las dos pletinas, ambas o ninguna han sufrido alguna fisura o grieta en la zona exterior de la pieza, por la zona doblada. En caso de que esto sucediera, se deberá remarcar la columna de “*Agrietamiento*” con una cruz.

Ejercicio 2:

Realizado los ensayos, se procede a realizar el estudio del desplazamiento de la línea neutra X_{LN} para las dos pletinas plegadas. Para ello, se hará uso de tres métodos: el primero partiendo de la tabla 4.4 y posteriormente aplicar la ecuación 4.5; el segundo método aplicando la ecuación 4.3 que depende de los valores del radio de doblado empleado y el espesor de la pieza; y el tercero, a través de un método experimental, que se procederá a explicar en detalle.

El método 1 y el método 3 estudiados no serán desarrollados en esta práctica, ya que los resultados obtenidos difieren en varias décimas a los resultados obtenidos con los tres métodos aplicados a esta práctica, ya que los valores proporcionados en las tablas de estos métodos son obtenidos experimentalmente o analizados sin tener en cuenta otra serie de factores y es normal encontrar ciertas diferencias con otros posibles métodos.

En cuanto al método experimental, se les proporciona a los alumnos en el “*ANEXO*” dibujo de la sección de una pletina. En ella se muestra diferentes elementos representativos como son las zonas de tracción A y compresión B , y las longitudes traccionadas L_T y compresionadas L_C .

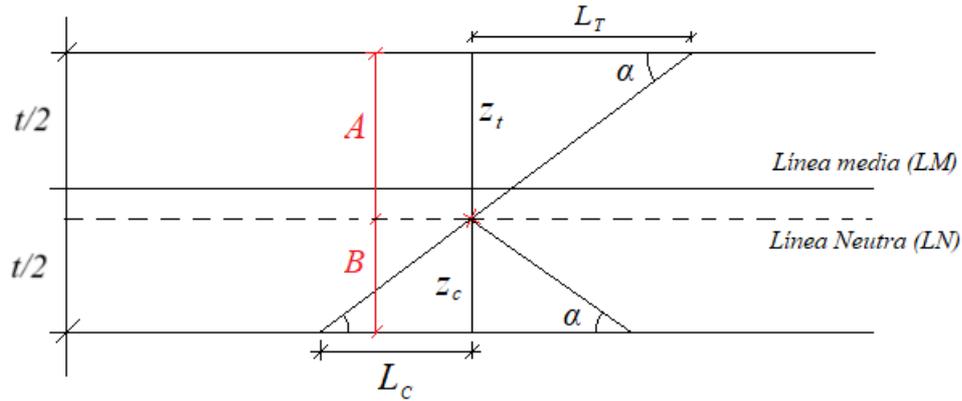


Figura 4.25: Representación de la sección de una pletina con las zonas de tracción y compresión

A partir de este dibujo, el alumno deberá comprender como actúa la pletina cuando se está plegando. Y con ello, a partir de las siguientes expresiones, buscar la relación entre dichas zonas para poder determinar cuánto ha traccionada o compresionada la pletina.

$$\tan(\alpha) = \frac{A}{L_T} = \frac{B}{L_C} \quad (4.21)$$

$$A + B = t \quad (4.22)$$

$$A = \frac{t}{\left(1 + \frac{L_C}{L_T}\right)} \quad (4.23)$$

$$B = \frac{L_C}{L_T} A \quad (4.24)$$

$$\lambda = B / t \quad (4.25)$$

Partiendo de estas expresiones. El proceso de resolución de la tabla 2 será el siguiente.

Se procederá, primeramente, a calcular los desplazamientos XLN_1 Y XLN_2 , y después se procederá a calcular XLN_3 .

Para obtener este valor, se obtendrá el valor de L_T y L_C midiendo tanto los radios exterior e interior de la pletina plegada a través de unas galgas de radio. Obtenido los radios correspondientes, se calcularán ambas longitudes con las siguientes expresiones:

$$L_C = \alpha \cdot R_i \quad L_T = \alpha \cdot R_{ext} \quad (4.26)$$

Siendo R_i el radio interior y R_{ext} de la pletina plegada, y α el ángulo de plegado, que para este ensayo será de 90° ($\pi/2$). Es fácil ver que, para la pletina plegada a mayor radio, la longitud traccionada de la pletina plegada a R_i será igual a la longitud compresionada para la pletina plegada R_2 , aunque siempre con un margen de diferencia de 1 mm por posibles holguras al realizar el plegado.

Una vez obtenido los valores tanto de L_C como de L_T , se procede a calcular los valores de las zonas traccionada A y compresionada B, a partir de las ecuaciones 4.23 y 4.24. Obtenidos esos valores, es apreciable ver que el valor B se corresponde con el desplazamiento de la línea neutra XLN_2 .

Para verificar que los valores obtenidos son correctos, el alumno puede hacer uso de la expresión 4.21. Esta

ecuación expresa que la suma de la zona traccionada y la zona compresionada debe sumar el espesor de la pieza. En caso de que este número no correspondiera con el valor del espesor, el alumno deberá revisar un posible fallo de cálculo.

Por último, a partir de la expresión 4.25 se podrá conocer el valor del factor λ .

Tras la finalización de los cálculos, el alumno deberá comprobar que los valores tanto de X_{LN1} , X_{LN2} y X_{LN3} no difieren entre sí y la diferencia entre ambos valores sea lo más mínima posible. Además, podrá comprobar el efecto del springback para ambas pletinas, siendo la recuperación elástica mucho mayor para la pletina plegada a menor radio con respecto a la pletina plegada a mayor radio.

5 CONCLUSIONES

Esta memoria buscaba el diseño de un modelo de prácticas para dos procesos de conformado plástico, con el fin de ser desarrolladas en los próximos años en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Tras la realización de esta memoria, se ha podido concluir que, mediante un estudio exhaustivo y profundo de la extensa teoría que abarca estos dos procesos de conformado plástico como son el doblado de tubos y el plegado de pletina, es posible llegar al diseño de una serie de modelos de prácticas que constan de diferentes ejercicios, con el fin de que, los alumnos que en un futuro realicen estas prácticas comprendan los conceptos básicos, para que puedan desarrollarlas y practicarlas a lo largo de su estancia en la ETSI y les sirva como conocimiento para su futuro laboral.

Por tanto, es posible crear un modelo de prácticas sencillo, rápido y flexible de realizar, donde se combina la parte teórica enseñada en las diferentes asignaturas del grado que corresponda y una parte práctico - experimental que permita al alumno ver de primera mano los fenómenos explicados anteriormente en las clases teóricas.

Este modelo de prácticas también puede servir como base, como otras prácticas diseñadas anteriormente por alumnos y profesores, para que los futuros profesores de la escuela puedan diseñar nuevos guiones prácticos siguiendo otros modelos, unas prácticas orientadas a analizar otros tipos de fallos o comportamientos en las piezas.

Analizando en detalle los dos procesos estudiados en la memoria, se ha comprobado que para el caso del doblado de tubos el factor más importante a estudiar y ser analizado por los alumnos es el factor de pared WF y el uso de rellenos o mandriles en el interior de la pieza, que tiene una gran influencia en la formación de arrugas en la zona interior de la pieza; y para el plegado de pletina el parámetro que más afecta al comportamiento de la pieza es el radio mínimo de doblado R_{min} .

5.1 Trabajos futuros

Tras la realización de los ensayos para los dos tipos de procesos de conformado plástico, se propone una serie de trabajos o estudios a realizar, basándose en la teoría de cada proceso, y en sus respectivas máquinas mostradas en esta memoria.

Para el doblado de tubos, haciendo uso de la máquina dobladora por arrastre rotativo, se propone lo siguiente:

- Estudio de los diferentes parámetros mecánicos, realizando una comparación mediante un ensayo experimental y una simulación numérica a través de diferentes programas, basados en la teoría de elementos finitos como ABAQUS o ANSYS.
- Estudio de la variación de los fallos mecánicos, como el arrugamiento o la deformación de la sección, mediante la utilización de mandriles de bolas.
- Realización de nuevos ensayos en la máquina dobladora, mediante el uso de nuevas matrices de presión y doblado de diferente sección, creadas a partir de fabricación aditiva.
- Configuración del modelo de prácticas presentado, centrándose en el uso de mandriles y rellenos de arena y agua congelada o en el uso de piezas de diferente material

Por otro lado, para el proceso de plegado de pletina se proponen realizar los siguientes estudios:

- Estudio de los diferentes fallos mecánicos en la chapa doblada, realizando varios ensayos, donde el parámetro principal a variar sea la holgura.
- Estudio de la chapa doblada, mediante doblados realizados a chapas que han sido sometidas a diferentes tratamientos térmicos.

- Estudio del proceso de doblado, realizando una comparativa entre los resultados obtenidos experimentalmente y los resultados conseguidos a través de simulaciones en diferentes programas.
- Comparativa de los diferentes parámetros y fallos mecánicos entre los diferentes procesos de doblado disponibles a realizar, como el doblado en V o el doblado con dado deslizante.

6 ANEXO I: MODELO PARA PRÁCTICA DE DOBLADO DE TUBOS

PRÁCTICA DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA. DOBLADO DE TUBOS POR ARRASTRE ROTATIVO.

Introducción

El doblado de tubos es un proceso de deformación cuyo objetivo principal es curvar un tubo o cualquier elemento de sección hueca, para proporcionarle un radio de curvatura deseado a un ángulo determinado (en este caso se realizarán a 90 grados todos los ensayos). Para el desarrollo de esta práctica se ensayará con uno de los métodos de este proceso más utilizados, el doblado de tubos por arrastre rotativo.

Compuesta de tres elementos principales: matriz de doblado, matriz de sujeción y las matrices de presión. En este método de doblado, la matriz de doblado o conformado realiza un movimiento giratorio conforme el tubo va siendo doblado y arrastrado, mientras las matrices de presión y sujeción impiden el desplazamiento de la pieza en otras direcciones.

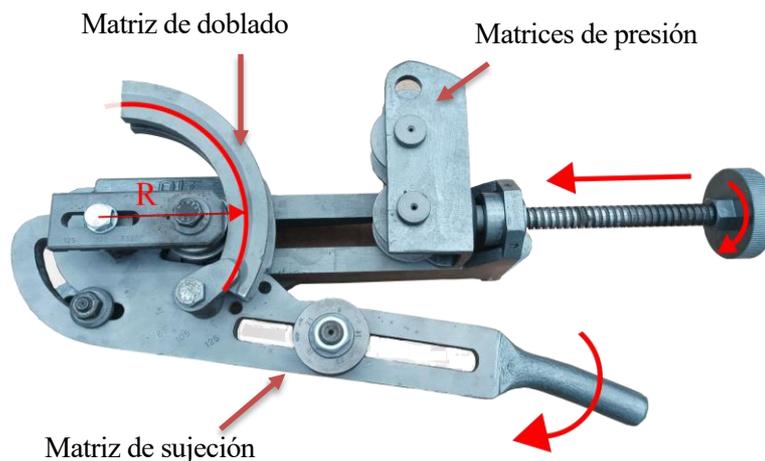


Figura 1: Máquina dobladora de tubos con sus diferentes elementos y respectivos movimientos

A diferencia de otros métodos, el doblado de tubos por arrastre rotativo es el único que permite el **uso de mandriles o rellenos en el interior del tubo**. Este elemento ejerce una presión interna sobre las paredes del tubo durante la operación de doblado, **permitiendo reducir la generación de fallos mecánicos** en la pieza. Para la realización de esta práctica, se utilizará rellenos de arena y una combinación de arena, agua y que posteriormente será congelada.

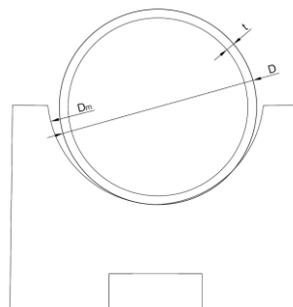


Figura 2: Sección de la matriz de doblado con tubo colocado

Parámetros de doblado

Durante el proceso de doblado, existirá una serie de factores que determinarán a lo largo de la operación que determinarán el resultado de la pieza final obtenida. Los parámetros más importantes a analizar en esta práctica son:

- **Factor de pared:** Denotado como WF , es un número adimensional que relaciona el diámetro exterior de la pieza con el espesor de pared de esta. Un alto valor de WF aumenta las probabilidades de generar fallos mecánicos en la pieza.

$$WF = \frac{D}{t} \quad (1)$$

Donde D es el diámetro exterior de la pieza y t el espesor de la pared.

- **Viabilidad de doblado:** Existe un factor K que permite determina la facilidad con la que un tubo puede ser doblado sin generar fallos en su superficie. Según el valor de K , se podrá determinar como de complicado es realizar la operación.

$$K = \frac{R \cdot t}{D^2} \quad (2)$$

Donde R es el radio de curvatura, D el diámetro exterior del tubos y t el espesor de pared. Según el valor de K , se podrá determinar como de complicado es realizar la operación:

- **$K > 0,3$ (Doblado fácil):** El curvado se realiza sin problemas y no es necesario utilizar ningún equipo o elemento adicional en la operación.
- **$0,3 > K > 0,1$ (Doblado moderado):** El proceso de doblado se dificulta y será necesario el uso de un mandril o relleno.
- **$0,1 > K > 0,08$ (Doblado complicado):** Es necesario el uso de un mandril fijo y una matriz deslizante o dado alisador, que permita evitar fallos en la pieza.
- **$0,08 > K > 0,05$ (Doblado de gran dificultad):** Para realizar la operación se necesitará usar un mandril articulado y un matriz deslizante.
- **$K < 0,05$ (Doblado imposible):** El tubo según las condiciones de la operación, es imposible doblarlo. Es necesario realizar varios ensayos para conseguir un aumento del coeficiente K .

A través de las gráficas presentadas en los anexos, se podrá determinar para un cierto diámetro de tubo, la facilidad de ser doblado.

- **Radio de curvatura:** Distancia exacta que va desde el centro de la matriz que conformará la pieza hasta el centro del tubo que se doblará. En el caso de tubos redondos se hace siempre referencia al radio medio, ya que este está relacionado con la línea central que pasa por el tubo. El radio mínimo de doblado a veces cumple que:

$$1,5 \leq \frac{R_{min}}{D} \leq 5 \quad (3)$$

Un mayor radio de doblado permite la reducción de defectos en la pieza doblada.

Defectos de doblado:

En gran parte de las operaciones de doblado de tubos, existen una serie de fallos mecánicos a tener en cuenta, que pueden afectar a la calidad y propiedades mecánicas de la pieza. Los defectos más propensos a producirse son:

- **Arrugamiento** en la zona interior de la pieza.
- **Ovalidad** o deformación de la sección circular del tubo: Esta se puede medir a través de los diámetros máximos y mínimos de la sección ovalada formada. Su valor típico está en torno a los 5 – 20 %.

$$u(\%) = \frac{D_{\text{máx}} - D_{\text{mín}}}{D} \quad (4)$$

- **Aplanamiento** de la zona exterior del tubo.
- **Fractura** en la zona exterior.
- **Springback**.
- **Engrosamiento o reducción** del espesor de la pared.

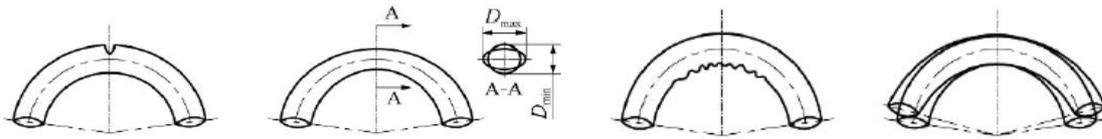


Figura 3: Defectos típicos de doblado de tubos: 1) Fractura 2) Ovalidad de la sección 3) Arrugamiento 4) Springback

OBJETIVOS:

- Realizar el doblado de un tubo para unos parámetros dados. Estimar el resultado previamente y comparar la estimación con el resultado experimental.
- Observar la influencia de los parámetros geométricos de la pieza y de la operación de doblado en la pieza final.
- Detectar los diferentes defectos presentes en la pieza conformada

TAREAS A REALIZAR:

- 1) Identificar las diferentes matrices de doblado y mediante un pie de rey o unas galgas de radio, medir el diámetro de la sección (D_m) de cada una. Además, identificar todos los radios de doblado (R_m) disponibles para cada una de las matrices.
- 2) Calcular el factor de pared WF de cada tubo y mediante la ecuación 3, estimar el radio de curvatura (R_{est}) más adecuado para realizar la operación.
- 3) Para el radio R_{est} , estimar la viabilidad del doblado de los tres tubos usando la ecuación 2 y las gráficas del factor K (*Anexo*)
- 4) Realizar varios ensayos a 90 grados para tres tubos de aluminio T4 de diferente relación WF , sin relleno y distinto radio de doblado (85,105 y 125 mm).
- 5) En caso de arrugamiento severo, repetir el ensayo con relleno de agua congelada y arena.

- 6) Medir la ovalidad de la sección de los tubos mediante la ecuación 4 y analizar la presencia de arrugamiento en la zona interior del tubo.

MATERIAL A EMPLEAR

- Pie de rey
- Galgas de radio
- Máquina dobladora de tubos manual
- Matrices de presión
- Matrices de doblado
- Matrices de sujeción
- Tubos de diferente diámetro y espesor
- Arena para relleno

HOJA DE TRABAJO

Alumno: _____

Fecha: _____ Grupo: _____

Ejercicio 1:

A través de un pie de rey o una galga de radio, determinar la sección de las diferentes matrices de presión y conformado disponibles y apuntar en la columna correspondiente los diferentes radios de curvatura que cada matriz permite.

	Número de identificación	Radios de doblado disponibles (mm)	Diámetro de la sección D_m (mm)
Matriz 1	N9		
Matriz 2	N11		
Matriz 3	N13		
Matriz 4	N16		
Matriz 5	N21		

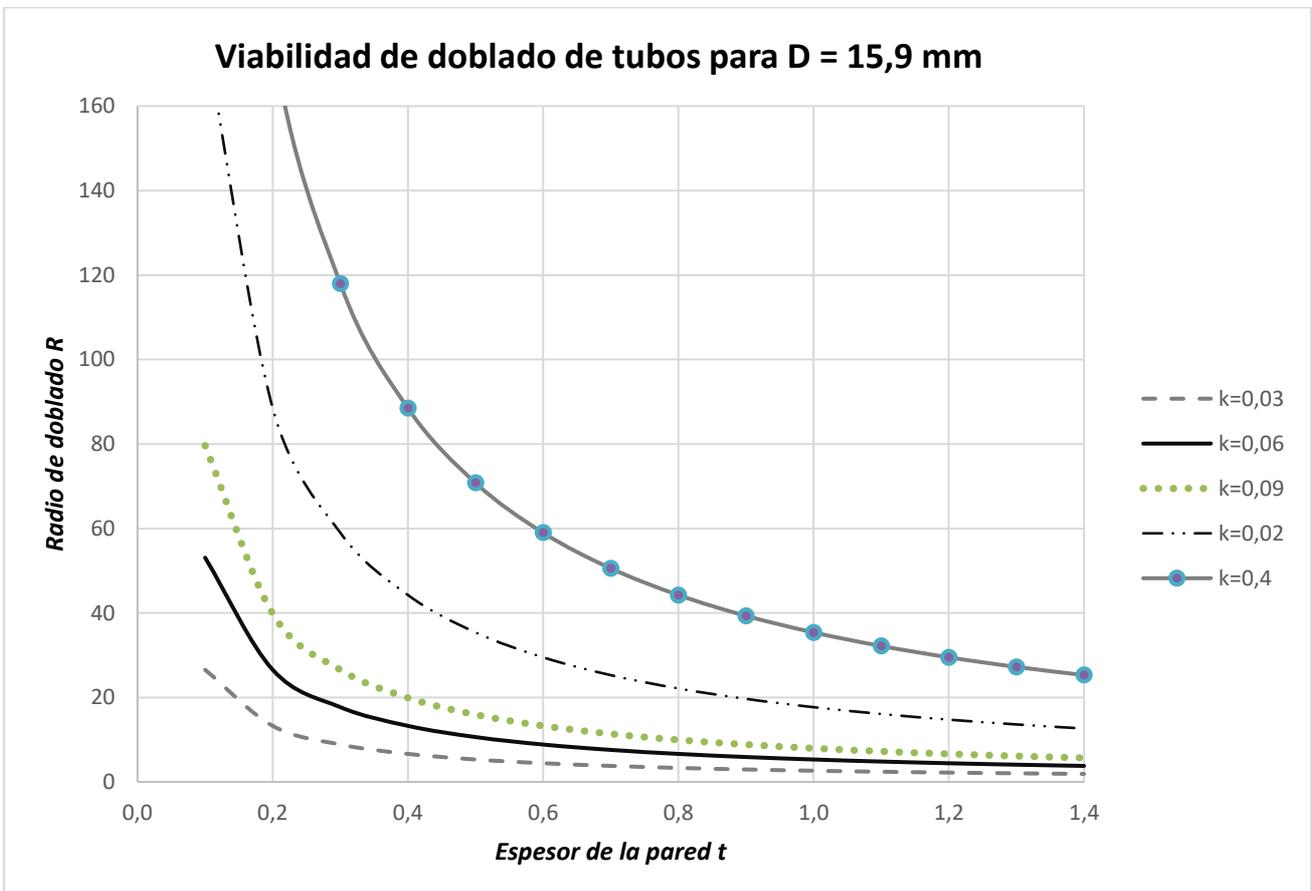
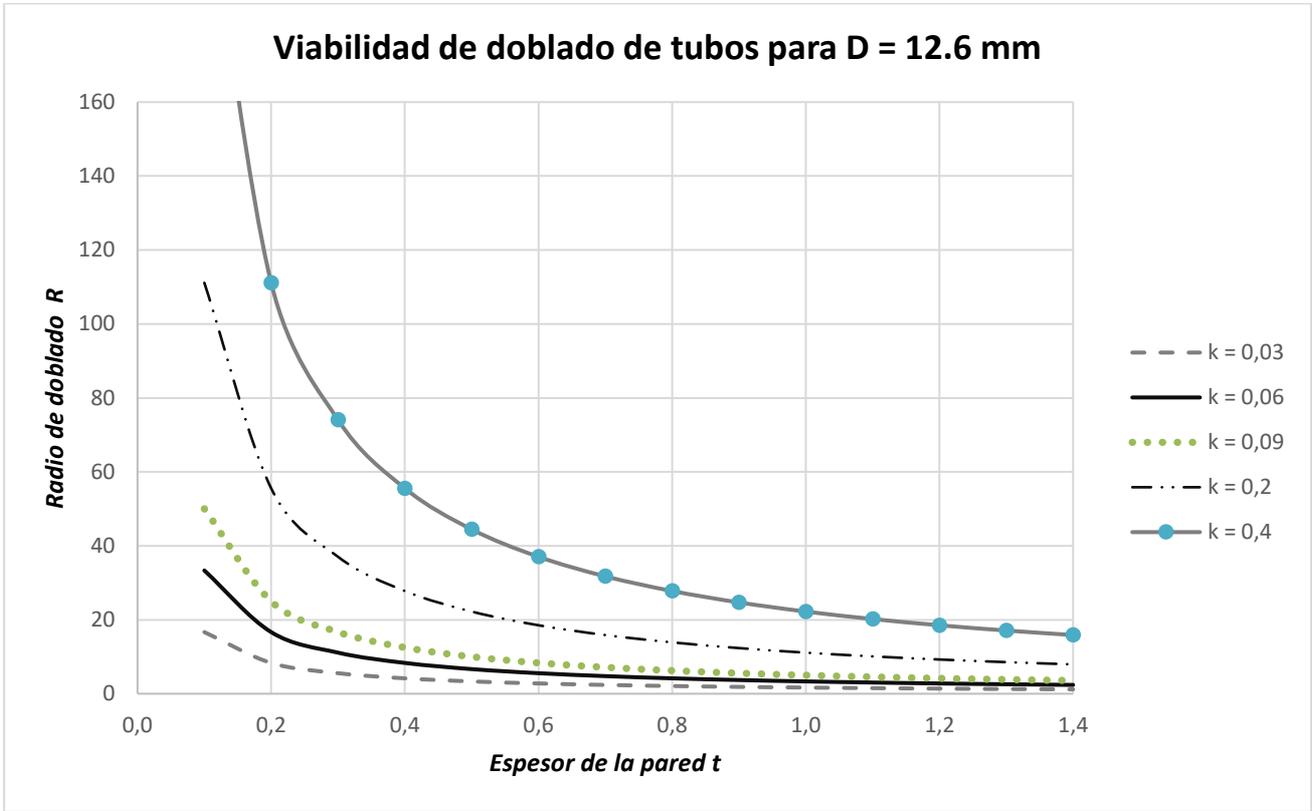
Ejercicio 2:

Realizar el doblado para los tres tipos de tubos disponibles, con relleno y sin relleno y mediante diferentes radios de doblado. Analizar tras los ensayos realizados, los fallos mecánicos producidos y la magnitud de estos según los diferentes parámetros de la operación.

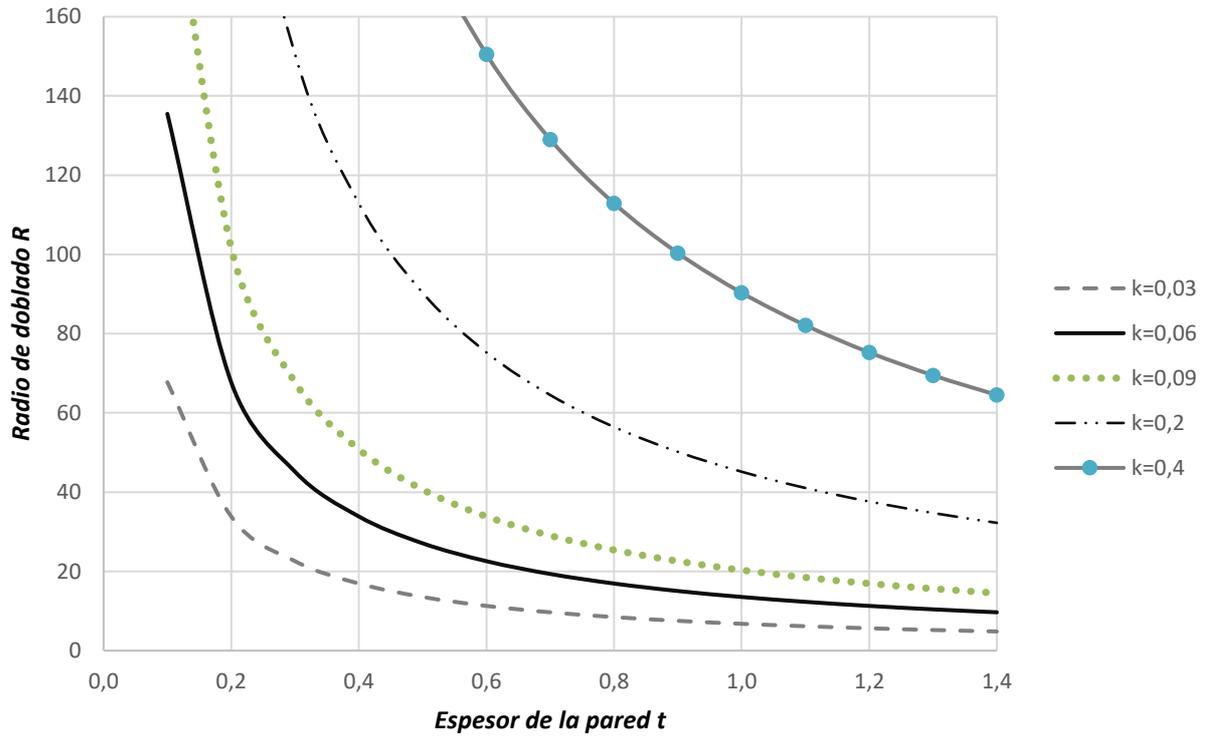
	WF (D/t)	R_{min} ($1,5 \leq \frac{R_{min}}{D} \leq 5$)	Matriz y radio de curvatura utilizado	Factor K	Arrugamiento	u (%)
Tubo sin mandril						
Tubo sin mandril						
Tubo sin mandril						
Tubo con relleno de arena y agua congelada						

ANOTACIONES

ANEXO: Gráficas del facto de viabilidad de doblado K



Viabilidad de doblado de tubos para D = 25,4 mm



7 ANEXO II: MODELO PARA PRÁCTICA DE PLEGADO DE PLETINA

PRÁCTICA DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA. PLEGADO DE PLETINAS POR DOBLADORA DE BORDES.

INTRODUCCIÓN

El plegado de pletina y perfiles metálicos de sección rectangular es un proceso de deformación plástica usado para dar forma a piezas originalmente planas, confiriéndoles cierto ángulo. La deformación plástica se localiza en la directriz o línea de doblado, permaneciendo el resto de la pieza indeformada. El defecto principal del proceso de doblado es la aparición de grietas en la parte exterior de la pieza, llegando incluso a producirse una fractura en dicha zona.

Esta práctica tiene como objetivo el plegado de pletinas mediante el uso de una máquina de doblado en voladizo o dobladora de bordes. En este tipo de doblado la pletina se sujeta a través de una mordaza o prensa, que contiene el radio de doblado que se aplicará a la pieza, mientras que, con la fuerza del punzón se conforma la pletina a lo largo de la prensa. La fijación de la placa de presión permite que el proceso sea de flexión pura, evitando que actúen fuerzas de tracción en el proceso.

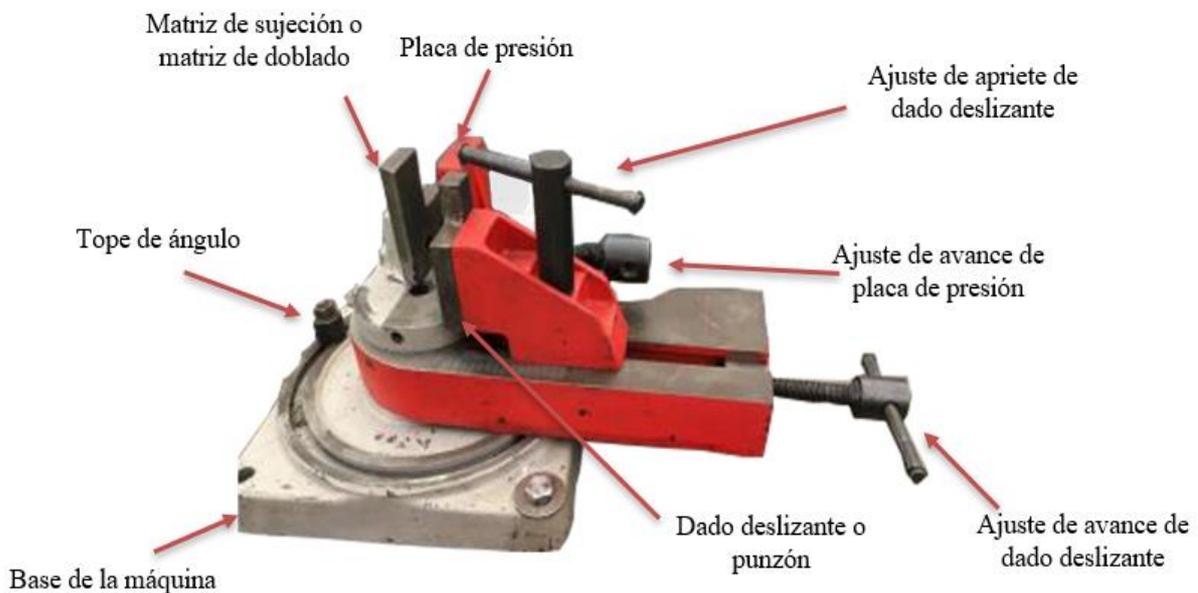


Figura 1: Máquina DISMA TRIS

Plegado de pletina:

Durante una operación de plegado o doblado, una pletina de espesor t y ancho w es sometida a un momento de flexión puro (sin la aplicación adicional de fuerzas de tracción y compresión sobre la pieza), para conferir un radio de doblado R y un ángulo de doblado θ . En la siguiente imagen, figura 2, se muestra una representación

de una pletina doblada.

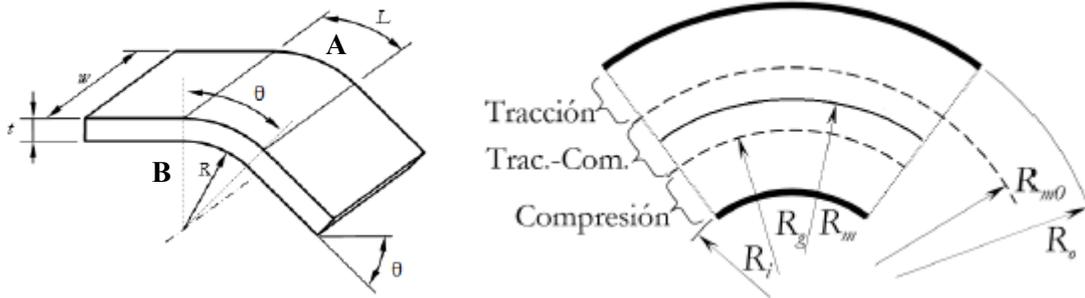


Figura 2: Representación de una pletina doblada y las diferentes zonas tras el conformado

Sometiendo a la pieza a un momento flector se alcanza unas deformaciones plásticas, que permitan obtener una pieza curvada y que, a su vez, generan un estado de tensiones de tracción – compresión. Este estado de tensiones es diferente según la zona estudiada...

La **cara exterior (A)** ha experimentado un **esfuerzo a tracción**, provocando que las fibras que están a lo largo de su espesor se alarguen, mientras la **cara interior (B)** ha sufrido una **compresión de sus fibras** y estas se acortan.

Por otra parte, como se observa en la figura 2 de la derecha, existen una serie de radios que definen la posición de estas fibras y zonas de la pletina. Los radios R_i y R_o corresponden a los **radios interior y exterior de la pieza**, respectivamente.

Por otra parte, un radio R_g , que corresponde al **radio de la línea neutra (LN)**. La línea neutra se define como la línea o zona donde se separan las fibras sometidas a tracción y compresión, por lo que, en ella la deformación es nula. Otros radios como R_m y R_{m0} , corresponden a la **superficie media y superficie indeformada de la pletina**, respectivamente. Esta última se define como la superficie cuya deformación longitudinal es nula y coincide con la inicial.

Para una pletina de longitud L , al ser plegada, su cara exterior (*extradós*) e interior (*intradós*) cambiarán su longitud debido a las fuerzas de tracción y compresión ejercidas sobre la pletina. Aplicando un plegado a cierto ángulo α , la longitud de las caras exterior L_T e interior L_C será:

$$L_T = \alpha \cdot (R_i + t) \quad L_C = \alpha \cdot R_i \quad (1)$$

Posición de la línea neutra:

Como se ha comentado anteriormente, la zona exterior está sometida a tracción, produciéndose un estiramiento de las fibras por esa zona, y la zona interior a compresión. Esto provoca un desplazamiento de la línea neutra que, generalmente, tiende a desplazarse hacia el radio interior R_i de la pletina, provocando la plastificación en su cara exterior.

Existen varios métodos y ecuaciones que permiten determinar su posición, el cual dependerá de parámetros como el radio de doblado R y el espesor de la pieza t . Para esta práctica veremos dos métodos analíticos (*Método 1* y *Método 2*), como otro experimental (*Método 3. ANEXO*)

Método 1:

Aplicando la siguiente expresión, a partir de los valores del radio de doblado R y el espesor de la pieza t , obtenemos el valor del desplazamiento de la línea neutra X_{LN1} medido desde el radio interior de la pletina.

$$X_{LN1} = \frac{t}{3} \sqrt[4]{\frac{R}{t}} \quad (2)$$

Método 2:

Partiendo de la relación R/t del ensayo, obtenemos directamente el valor del factor λ que, multiplicada por el espesor de la pieza, permitirá obtener el desplazamiento de la línea neutra, medido desde su superficie inferior. A través de esta tabla, se puede apreciar que una disminución de la relación R/t provoca una disminución más intensa y un mayor desplazamiento de la línea neutra hacia el interior de la pletina.

Relación R/t	λ
0,1	0,21
0,4	0,24
0,8	0,30
1	0,31
1,5	0,36
2,5	0,4
5	0,46
7,5	0,50

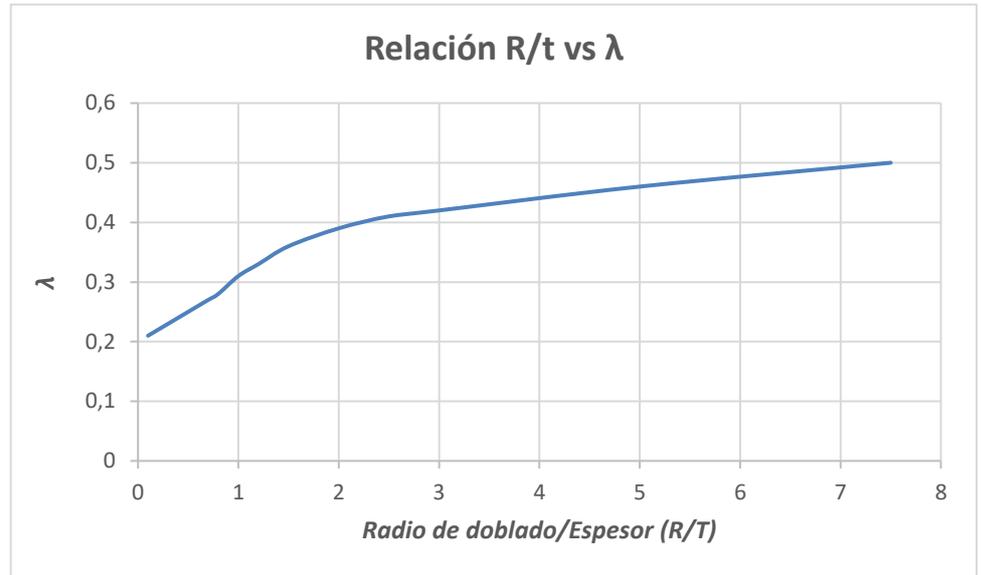


Figura 3: Tabla y gráfica de relación $R/t - \lambda$

El cálculo del desplazamiento de la línea neutra se obtiene de la siguiente expresión:

$$X_{LN2} = \lambda \cdot t \quad (3)$$

PARÁMETROS DE DOBLADO

En la Figura 4, se pueden observar diferentes parámetros que influyen en la pletina metálica ya conformada.

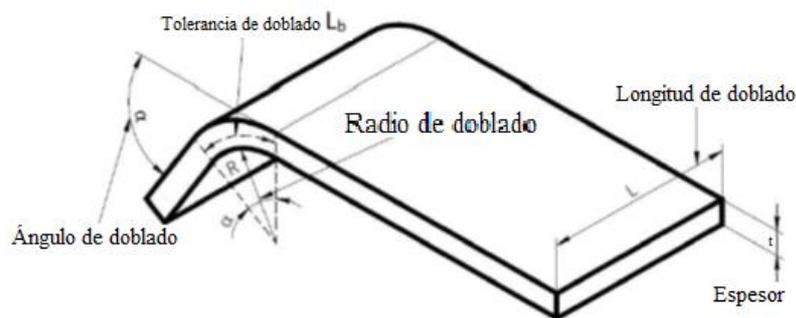


Figura 4: Parámetros de doblado

Existen varias condiciones en la operación de doblado de pletina que pueden alterar el resultado de la pieza final de trabajo. Los dos más importantes a estudiar en esta práctica son:

- **Radio mínimo de doblado:** Se define como el radio a partir del cual, una pieza se puede doblar sin producirse agrietamiento en su zona exterior. Cuanto mayor sea su valor, menor será la probabilidad de aparecer grietas y, si este valor disminuye, la probabilidad de formación de grietas será mayor.

$$R_{\min} = t \left(\frac{1 - \lambda}{r} - 1 \right) \quad (4)$$

Donde R_{\min} es el radio de doblado mínimo, t es el espesor de la pletina, r es la reducción de tensión del área de la pletina y λ es un factor que define la posición de la línea neutra.

Como se muestra en la Figura 5, podemos relacionar para distintos valores de R/t , el valor de la reducción de área.

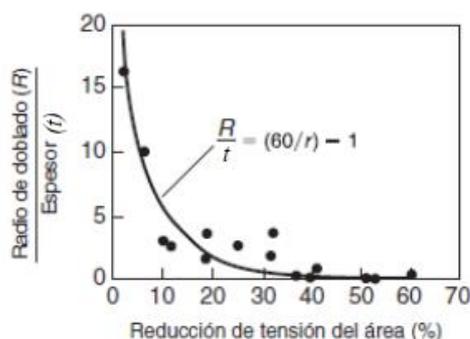


Figura 5: Relación entre el cociente R/T y la reducción de tensión del área

- **Material:** El trabajo con materiales con un alto módulo de elasticidad E , es decir, de mayor rigidez, implica realizar los doblados con un mayor esfuerzo respecto a otros con un E menor. Otros factores como la ductilidad del material también son importantes, ya que los materiales más dúctiles permiten un conformado más eficaz que un material frágil, ya que estos últimos tienden rápidamente a la fractura de la pieza. Muchas de estas propiedades se obtienen de manera experimental a través de ensayos previos de tracción, compresión, etc.

DEFECTOS DEL PROCESO

En relación con los parámetros anteriores, el aumento o disminución del valor de cada uno de estos puede originar una serie de defectos, que se han ido presentado anteriormente. Entre los más importantes a evitar, para conseguir una pieza de trabajo de calidad, son:

- **Agrietamiento:** Durante la operación de doblado, el material tiende a traccionar por su zona exterior. Las fibras exteriores de esa zona sufren un estiramiento, generando un movimiento entre los granos de la pieza. Esto tras llegar a un valor excesivo, provoca la generación de grietas en la superficie exterior de la pieza.
- **Hendiduras:** Pequeño surco producido en la zona interior de la pletina debido a la presión ejercida por la matriz de doblado y la escasa resistencia de la pieza al ser sometidas a estas.
- **Fractura:** Existen dos tipos de fractura, según el tipo de material: dúctil y frágil. La fractura frágil se caracteriza por la propagación rápida de grietas por clivaje, provocando la fractura de la pieza sin sufrir deformaciones previamente, mientras la fractura dúctil se caracteriza por producirse grandes deformaciones plásticas antes de producirse el fallo en la pieza (caso de estudio de esta práctica). Según las condiciones de deformación, la fractura dúctil puede producirse por acciones cortantes (usualmente en procesos de compresión) o por nucleación, crecimiento y coalescencia de huecos en el material (procesos de tracción).

Para esta práctica se trabajará con materiales dúctiles como el aluminio.

- **Springback:** Fallo mecánico donde la pieza debido a las propiedades elásticas de su material, tras retirar la carga ejercida por el punzón o en este caso el dado deslizante, esta tenderá a recuperar parte de su forma original.

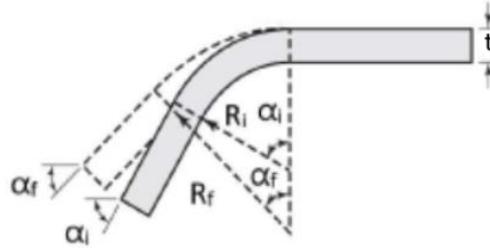


Figura 6: Esquema del suceso de springback en el doblado de pletina

Una expresión muy utilizada para definir el fenómeno del springback es el siguiente:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{Et} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{Et} \right) + 1 \quad (5)$$

Donde R_i y R_f son los radios iniciales antes del springback y radio posterior al suceso del springback. E es el módulo elástico o módulo de Young de la pieza, Y el límite de fluencia del material y t el espesor de la pieza.

OBJETIVOS

1. Identificar los posibles defectos existentes en cada uno de los ensayos realizados.
2. Comprender el concepto de línea neutra (LN) y los diferentes métodos para su localización.
3. Analizar el comportamiento de las pletinas en base a sus propiedades mecánicas y materiales.
4. Determinar la influencia del aumento o disminución de los radios de doblado, para los diferentes defectos presentes en la pieza final.

RESOLUCIÓN DE LOS EJERCICIOS PROPUESTOS:

Para la realización de esta práctica, se dispondrá de dos pletinas de diferentes propiedades materiales y geométricas (como espesor de la pletina t o la reducción de área r). Antes de pasar a la realización de los ensayos, el alumno deberá recopilar en la tabla de propiedades toda la información necesaria acerca de las pletinas para, tras la realización de los ensayos, averiguar cómo afectan cada uno de ellos en el desarrollo de los defectos en la superficie de la pieza.

Ejercicio 1:

- 1) A partir de la ecuación 4 calcular el radio mínimo de doblado R_{min} necesario para que las pletinas al ser plegadas no sufran agrietamiento en su cara exterior.
- 2) Estimar a partir de las diferentes pletinas, cuál debe ser la combinación posible para realizar el plegado a cierto radio R_{est} .
- 3) Colocar las pletinas de manera sucesiva y realizar el plegado hasta un ángulo de 90° (es necesario colocar el tope detrás de la línea marcada para realizar el plegado a dicho ángulo)
- 4) Realizar el plegado y posteriormente comprobar si existe la aparición en cualquiera de las pletinas de agrietamientos y hendiduras en su cara exterior.

Ejercicio 2:

- 1) Aplicamos la fórmula 2 para obtener XLN_1 , y posteriormente se dividirá por el valor del espesor de la pieza para obtener el valor de λ .
- 2) A partir de las tablas proporcionadas, de la relación $R/t - \lambda$, obtener el valor de λ para el caso del radio de doblado R y el espesor de la pletina t empleado. Una vez calculado, para obtener XLN_2 aplicamos la expresión 3.
- 3) Mediante el uso de unas galgas de radio, medir el radio exterior R_{ext} y radio interior R_{int} de las pletinas

plegadas simultáneamente.

- 4) A partir de los valores medidos de R_{ext} y R_{int} , calcular la longitud traccionada (L_T) y compresionada (L_C) de cada pletina, a partir de las siguientes expresiones:

$$L_T = \alpha \cdot (R_{ext}) \quad L_C = \alpha \cdot (R_{int}) \quad (5)$$

Donde α es el ángulo de doblado, en este caso 90° ($\pi/2$).

- 5) Con ayuda del dibujo mostrado en el Anexo y las diferentes ecuaciones mostradas, calcular el desplazamiento de la línea neutra tras ser plegada λ .
- Calcular el desplazamiento de las zonas traccionadas y compresionadas (A y B) a partir de las expresiones 8 y 9
 - Calcular el factor λ a través de la expresión 10
 - El desplazamiento de la línea neutra X_{LN3} será el mismo valor que el valor de la zona de compresión B calculada.
- 6) Comparar resultados y ver que, para los tres métodos, los resultados no difieren entre sí

MATERIAL A EMPLEAR

- Pletinas de diferentes medidas y propiedades
- Máquina plegadora de pletina en voladizo
- Matrices de diferentes radios de doblado
- Galgas de radio
- Pie de rey

HOJA DE TRABAJO

Alumno: _____

Fecha: _____ Grupo: _____

Tabla de propiedades de las pletinas:

	E	t	σ_e	r
Pletina 1				
Pletina 2				

Ejercicio 1:

Realizar el plegado simultáneo de las dos pletinas disponibles a partir de los datos recopilados en la práctica y utilizando un radio de doblado adecuado según las ecuaciones vistas.

	R_{\min}	R_{est}	<i>Agrietamiento</i>	<i>Hendiduras</i>
Pletina 1				
Pletina 2				

Ejercicio 2:

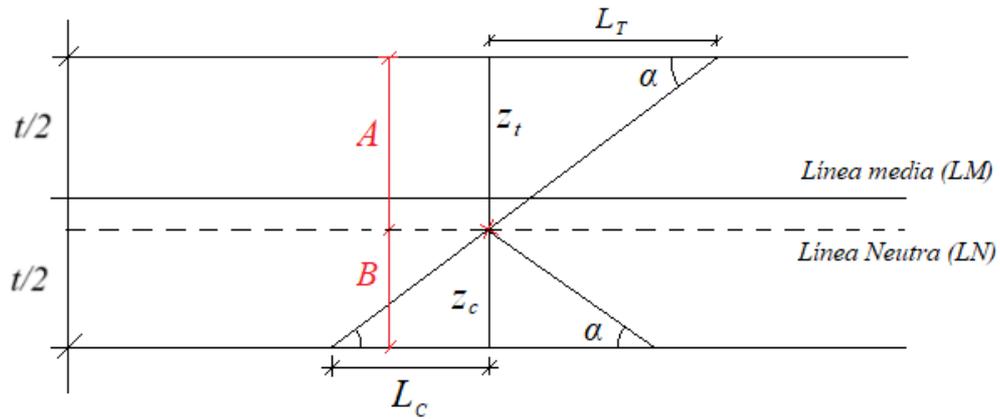
Calcular la posición de la línea neutra a partir de los métodos explicados y, a su vez, obtenerla de manera experimental y realizar una comparación entre los métodos.

	X_{LN1} (Método 1)	λ_1	R/t	λ_2	X_{LN2} (Método 2)	L_T/L_C	A/B	X_{LN3} (Método 3)	λ_3
Pletina 1						/	/		
Pletina 2						/	/		

ANOTACIONES

ANEXO

Cálculo del desplazamiento de la línea neutra.



Ecuaciones:

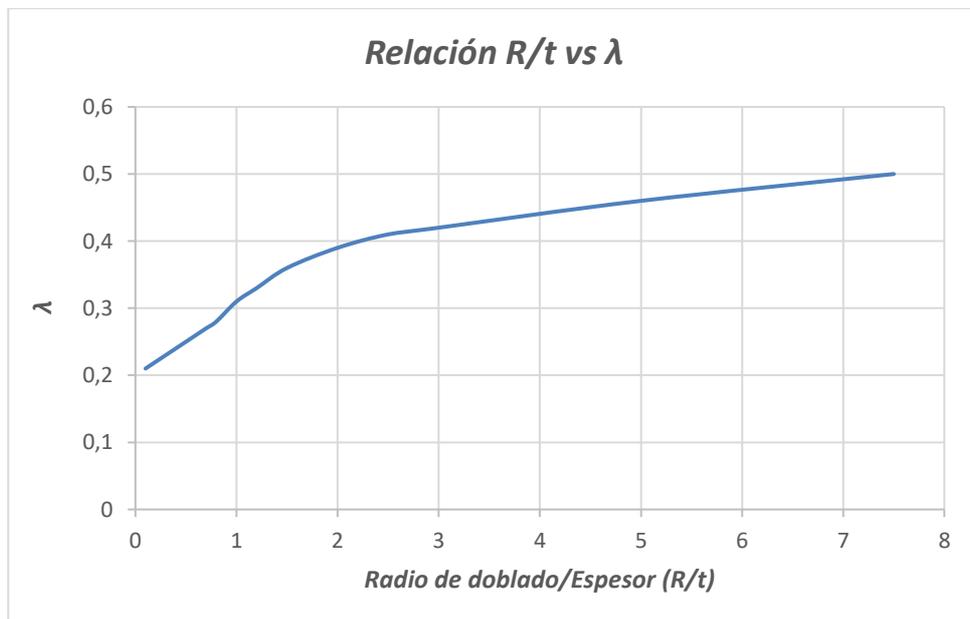
$$\tan(\alpha) = \frac{A}{L_T} = \frac{B}{L_C} \quad (6)$$

$$A + B = t \quad (7)$$

$$A = \frac{t}{\left(1 + \frac{L_C}{L_T}\right)} \quad (8)$$

$$XLN_3 = B = \frac{L_C}{L_T} A \quad (9)$$

$$\lambda = B/t \quad (10)$$



BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Zhang, «Steel Bending and Cracking: Factors and Improvement Measures,» 25 Abril 2023. [En línea]. Available: <https://www.machinemfg.com/steel-bending-and-cracking/>.
- [2] R. M. Tools, «AIR BENDING VS BOTTOM BENDING,» [En línea]. Available: <https://www.rmtus.com/air-bending-vs-bottom-bending>.
- [3] E. Simonetto, A. Ghiotti, S. Bruschi y R. Gemignani, «Dynamic detection of instability defects in tube rotary draw bending,» *Procedia Manufacturing*, vol. 10, p. 319 – 328, 2017.
- [4] J. M. Montes Martos, F. Gómez Cuevas y J. Cintas Físico, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Madrid: Paranainfo, 2014.
- [5] Mohinder L. Nayyar, *PIPING HANDBOOK*, Seventh ed., Estados Unidos: McGraw-Hill, 2017, pp. 285-288.
- [6] G. Miller, *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*, Deadborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [7] KOMASPEC, «Air Bending and Bottom Bending Sheet Metal,» 5 de Junio de 2020. [En línea]. Available: <https://www.komaspec.com/about-us/blog/the-difference-between-air-bending-and-bottom-bending-for-sheet-metal/>.
- [8] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Quinta edición, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [9] L. Heng, Y. He, Z. Zhiyong y W. Zekang, «‘Size effect’ related bending formability of thin-walled,» *Chinese Journal of Aeronautics*, nº 26, pp. 230-241, 2013.
- [10] A. Hedrick, «Know your bending basics—Part I,» 15 Mayo 2001. [En línea]. Available: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/know-your-bending-basicsaeuropart-i>.
- [11] M. Guillén Pelayo, «Implementación en ensayos de doblado en diferentes condiciones y materiales para prácticas de laboratorio,» Universidad de Sevilla. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales., Sevilla, 2016.
- [12] F. A. Galisteo Vicente, «Análisis de recuperación elástica en doblado de chapa gruesa de aluminio,» Universidad de Sevilla. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, Sevilla, 2018.
- [13] A. I. Escribano y R. Abascal Herranz, «Doblado y curvado,» [En línea]. Available: <http://de-duce-tu.blogspot.com/p/5doblado-curvado-y-plegado.html>. [Último acceso: 5 Junio 2023].
- [14] Biltra, «Tratamientos térmicos del aluminio / T4-puesta en solución y maduración natural,» 23 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.biltra.com/tratamientos-termicos-de-laluminio-t4-puesta-en-solucion-y-maduracion-natural/>.

- [15] S. Benson, «Aspectos generales del doblado: los fundamentos del doblado pesado,» 12 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://www.thefabricator.com/thefabricatoren espanol/article/bending/aspectos-generales-del-doblado-los-fundamentos-del-doblado-pesado>.
- [16] S. Benson, «How to heat aluminum to avoid cracking after bending,» 29 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/how-to-heat-aluminum-to-avoid-cracking-after-bending>.
- [17] S. Benson, «Grain direction's effect on sheet metal bending,» 24 Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/bending/grain-directions-effect-on-sheet-metal-bending>.
- [18] R. Agarwal y J. Wang, «Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, pp. 23-62, 2006.
- [19] «Sheet Metal Bending,» [En línea]. Available: https://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html. [Último acceso: 2023].
- [20] «Hidroconformado,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidroconformado>.
- [21] J. L. Hurtado Ortega, R. Santana Milán y J. A. Ruiz, «Análisis y síntesis de la planeación del proceso de doblado de tubos por arrastre,» *Artículo de Investigación. Revista Ciencia e Ingeniería.*, vol. 34, nº 1, pp. 3-12, 2013.
- [22] Z. Zhang, J. Wu, X. Xu, Z. Yang, W. Wu y L. Liu, «Mechanical Modeling of Tube Bending Considering,» *MDPI*, 2022.
- [23] «DE MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/dobladoras-de-cano-o-tubo>.
- [24] AGGRESSIVE TUBE BENDING, «Historia del doblado de tubos,» 19 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://blog.es.aggressivetube.com/2022/08/19/historia-del-doblado-de-tubos/>.
- [25] OMNI-X, «Doble rotativo (Rotatory Draw Bending),» 2020. [En línea]. Available: <https://www.omni-x.com/mx/es/rotary-draw-bending>.
- [26] Southern Fabricating Machinery Sales, «The Different Types of Tube Bending,» 26 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.southernfabsales.com/blog/different-types-of-tube-bending>.
- [27] D. Morales Palma, «Análisis del efecto de la flexión en la conformabilidad de chapas metálicas,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2010.
- [28] M. L. García Romeu de Luna, «Contribución al proceso de doblado de chapa al aire. Modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final,» Universitat de Girona, Girona, 2005.
- [29] K. Junkersfeld, «Residual Stresses: La importancia de las tensiones residuales,» 5 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/residual-stresses-la-importancia-de-las-tensiones-klaus-junkersfeld/?originalSubdomain=es>.

- [30] R. Hambli, A. Mkaddem y A. Potiron, «Damage prediction in L-bending processes using FEM,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, nº 1, pp. 12-19, 2003.
- [31] V. Hauk, «Assessment of residual stresses,» de *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods*, ELSEVIER SCIENCE B.V., 1997, pp. 590-636.
- [32] Á. J. Cuadrado Alvarado, «Análisis numérico del proceso de conformado de tubos por flexión,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2010.
- [33] TECNOCURVE, «Como calcular la viabilidad de doblado de un tubo,» 1 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.tecnocurve.es/doblar-tubo/como-calcular-la-viabilidad-de-doblado-de-un-tubo/>. [Último acceso: 16 Junio 2023].
- [34] G. Rui-jie, Y. He, Z. Mei y L. Heng, «Springback of thin-walled tube NC precision bending and,» *The Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 16, nº 2, pp. 631-638, 2006.
- [35] L. Heng, . Y. He, . Z. Mei y G. Rui-Jie, «Forming characteristics of thin-walled tube bending,» *The Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 16, nº 2, pp. 613-623, 2006.
- [36] TECNOCURVE, «Curvado de tubo: la importancia del radio de curvado,» 26 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.tecnocurve.es/doblar-tubo/curvado-de-tubo-la-importancia-del-radio-de-curvado/>. [Último acceso: 21 Junio 2023].
- [37] PRO-TOOLS, «Wall Factor and D of Bend: Getting to the Center of the Centerline Radius Debate,» 25 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://pro-tools.com/blogs/protoolsusa/42288387-wall-factor-and-d-of-bend-getting-to-the-center-of-the-centerline-radius-debate>. [Último acceso: 28 Mayo 2023].
- [38] The Library of Manufacturing, «Sheet Metal Bending,» [En línea]. Available: https://thelibraryofmanufacturing.com/sheetmetal_bending.html. [Último acceso: 2023 6 28].
- [39] TYT Steel, «Historia De La Tubería De Acero,» 24 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.tyt-steelpipe.com/news/steel-pipe-history-21346054.html#:~:text=La%20evidencia%20arqueol%C3%B3gica%20sugiere%20que,plomo%20se%20construyeron%20en%20Europa..>
- [40] PINES, «HISTORY,» 2023. [En línea]. Available: <https://pines-eng.com/history/>. [Último acceso: 5 Junio 2023].
- [41] L. Lazarescu y J. Slota, «Deformation behavior of circular tubes in rotary draw bending process with internal fluid pressure,» *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 16, nº 4, pp. 40-45, 2018.
- [42] M. Domínguez, F. Faura y M. A. Sebastián, «Aproximación histórica a los procesos de conformado de chapa por punzonado,» Cartagena (Murcia), 1992.
- [43] M. P.Groover, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, Tercera ed., McGraw-Hill/INTERAMERICANA, 2007.
- [44] E. Vidal Gómez, «Estudio de la recuperación elástica en el doblado de chapa asistido por pulsos de alta densidad de corriente,» Barcelona, 2013.

- [45] F. J. Abellán Cabrera, «Análisis numérico del proceso de laminación,» Leganés, 2014.
- [46] Artizono, «Calculadora del factor K: Guía para el plegado de precisión en la fabricación de chapas metálicas,» 2 Abril 2024. [En línea]. Available: https://artizono.com/es/calculadora-del-factor-k/#google_vignette.