



**REPUBLICA DE CUBA
UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE ESTUDIOS CAD/CAM**

**OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LOS PARÁMETROS QUE
INTERVIENEN EN LOS PROCESOS DE DOBLADO DE TUBOS CILÍNDRICOS
METÁLICOS POR EL METODO DE ARRASTRE**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Ing. JORGE LUIS HURTADO ORTEGA

Holguín, septiembre de 2011

**REPUBLICA DE CUBA
UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE ESTUDIOS
CAD/CAM**

**OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LOS PARÁMETROS QUE
INTERVIENEN EN LOS PROCESOS DE DOBLADO DE TUBOS CILÍNDRICOS
METÁLICOS POR EL METODO DE ARRASTRE**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.

Autor: Ing. Jorge Luís Hurtado Ortega

Tutor: Dr. C. Raúl Santana Milán

Holguín, septiembre de 2011

AGRADECIMIENTOS:

Eppur si muove

Galileo Galilei

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Convenio Cuba Venezuela, el cual hizo posible la realización de este doctorado, también a las autoridades de La Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” y La Universidad Politécnica Territorial de Aragua “Federico Brito Figueroa”. También quiero expresar mi agradecimiento a los Doctores Raúl Santana, Ricardo Ávila, y José Arzolla por su valiosa ayuda y colaboración y muy especialmente al Dr. Jorge Laureano Moya Rodríguez quien fue mi principal colaborador en la ejecución de este trabajo. También mi amigo y compañero de trabajo y estudio Javier Cárdenas colaboró ampliamente en la ejecución de esta tesis, gracias amigo.

DEDICATORIA

Quiero dedicarles esta tesis a mis padres, ellos me dieron todas las oportunidades para que yo pudiera ser un hombre de bien, también a mis hermanos Julio Cesar y María Gabriela y a mi niña linda Isis Gabriela, mi Colibrí, es lo mejor que me ha pasado en la vida.

SÍNTESIS

El proceso de doblado de tubos por arrastre es ampliamente utilizado en la industria automotriz, aeroespacial y otras. Durante el proceso de doblado ocurren considerables variaciones en el espesor de la pared y el radio del tubo, en algunos casos, cuando el factor de pared es grande y el grado de doblado es pequeño pueden aparecer arrugas en la parte interna de la curva.

En el presente trabajo de investigación se establece un modelo de optimización multiobjetivo que relaciona la magnitud de las cargas que intervienen en el proceso con la geometría del doblado y el material de trabajo, con la finalidad de minimizar los defectos de excesivo adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas en la pared del tubo.

Se desarrolla un modelo matemático analítico basado en la teoría de la deformación plástica, para determinar el cambio de la sección transversal del tubo y el cambio de espesor de la pared así como la posibilidad de disminuir o evitar la formación de arrugas en la parte interna de la curva en diferentes condiciones de carga.

ÍNDICE

Contenido	Página
Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
Resumen	v
Índice	vi
Glosario	xi
Índice de figuras	xvi
Índice de tablas	xvii
INTRODUCCIÓN	1
1. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL DEL PROCESO DE DOBLADO	12
1.1. Generalidades. Fundamentos de la deformación plástica	12
1.2. El proceso de doblado	12
1.3. El proceso de doblado de tubos y tuberías	16
1.4. El método de doblado por arrastre	20

Continuación

Contenido	Página
1.4.1. Herramientas necesarias para el proceso de doblado de tubos por arrastre	27
1.4.2. Campo de utilización del método de doblado por arrastre	32
1.4.3. Cargas y esfuerzos existentes en el doblado por arrastre	33
1.4.4. Defectos que surgen en el proceso de doblado por arrastre	33
1.5. Máquinas de doblado de tubos por arrastre	36
1.6. Software utilizados en procesos de doblado de tubos por arrastre	37
1.7. Aplicación de las técnicas modernas del análisis y síntesis de sistemas de ingeniería a la preparación para la fabricación por conformación plástica	39
1.8. Diferentes métodos de solución de los problemas de optimización multicriterial	43
1.8.1. Optimización matemática	43
1.8.2. Optimización heurística	46
Conclusiones	50
2. MODELO MATEMÁTICO CONCEPTUAL:	52
2.1. Introducción	52

Continuación	
Contenido	Página
2.2. Modelo matemático propuesto	52
2.3. Esfuerzos axiales, circunferenciales y radiales:	54
2.3.1 Tensiones originadas por el momento flector y la carga axial	54
2.3.2 Tensiones originadas debido a la presión interna	57
2.3.3 Estado resultante de esfuerzos	57
2.3.4 Desplazamiento del eje Neutro	58
2.4 Cambio del espesor de la pared y distorsión de la sección transversal del tubo doblado	60
2.5 Determinación del rango de variación de los espesores de pared y los radios del tubo en la sección transversal de la curva	61
2.6 Determinación del rango de variación de las variables independientes que intervienen en el modelo	63
2.6.1 Determinación de los intervalos de valores para la variable independientes σ_{xf}	63
2.6.2 Determinación de los intervalos de valores para la variable independientes P_i	67

Continuación

Contenido	Página
2.7 Relación entre la magnitud de la presión interna P_i y la holgura entre el diámetro interno del tubo y el diámetro del mandril	69
2.7.1 Cálculo de la holgura entre el diámetro interno del tubo y el mandril	70
Conclusiones	77
3 PROCEDIMIENTOS PARA LA CONCEPCIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO PARA EL PROCESO DE DOBLADO DE TUBOS POR ARRASTRE	79
3.1 Introducción	79
3.2 Solución del problema usando el método de las aproximaciones sucesivas (<u>Chevichev</u>) y el software <u>MATHEMATICAL</u>	80
3.2.1 Análisis externo del proceso de fabricación como tarea de Preparación y Toma de Decisiones	80
3.3 Modelo matemático conceptual	83
3.4 Determinación de las funciones objetivo	83
3.5 Las Restricciones	86
3.6 El algoritmo utilizado	87
3.7 Resultados del análisis del doblado de tubos:	90

Continuación

Contenido	Página
3.7.1 Resultados de las corridas en el software <u>MATHEMATICAL</u> de las funciones objetivo en relación a las cargas P_i y σ_{xf}	90
3.7.2 Resultados del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev	93
3.7.3 Verificación del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el software <u>MATHEMATICAL</u>	93
Conclusiones	98
Conclusiones Generales y Recomendaciones	99
Bibliografía	100
Anexos	108
Anexo I. Determinación de las variaciones del espesor y radio del tubo con carga axial σ_{xf} variable y presión interna P_i constante en el Software <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	108
Anexo II. Determinación de las variaciones del espesor y radio del tubo con presión interna P_i variable y carga axial σ_{xf} constante en el Software <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	110
Anexo III. Determinación de los intervalos de los valores de la variable de coordinación Presión interna P_i en el Software <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	112

Continuación	
Contenido	Página
Anexo IV. Determinación de la variación de las funciones objetivo en función de los valores de la variables de coordinación carga axial σ_{xf} y Presión interna P_i en el Software <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	114
Anexo V. Resultados del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	116
Anexo VI. Verificación del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el software <u>MATHEMATICAL</u> ® 7	122

GLOSARIO

Caracteres latinos

A	Área de la sección transversal del tubo
CLR	Radio de doblado después de la recuperación elástica
dP_c	Carga circunferencial elemental actuando sobre el elemental segmento
dP_x	Carga axial elemental actuando sobre el elemental segmento
dP_{xf}	Carga axial elemental actuando sobre el elemental segmento inducida por la carga axial
dP_{xm}	Carga axial elemental actuando sobre el elemental segmento inducida por el momento de doblado
dP_r	Carga radial elemental actuando sobre el elemental segmento
d_v	Carga centrípeta elemental actuando sobre el elemental segmento
$d\theta$	Diferencial del ángulo θ
$d\sigma_c$	Esfuerzo circunferencial elemental actuando sobre el elemental segmento
D	Diámetro externo del tubo
D_{max}	Diámetro máximo del tubo
D_{min}	Diámetro mínimo del tubo
D_0	Diámetro interno del tubo
DOB	Factor de doblado
e	Desplazamiento del eje neutro
E_{eqv}	Módulo elástico equivalente
E_1	Módulo elástico del los material del tubo

Continuación

E_2	Módulo elástico del los material del mandril
f	Coeficiente de roce
F	Carga axial
f_p	Función de aplanamiento de pared
f_{pd}	Función deseada de aplanamiento de pared
$f_p O$	Función óptima de aplanamiento de pared
f_t	Función de adelgazamiento de pared
f_{td}	Función deseada de adelgazamiento de pared
$f_t O$	Función óptima de adelgazamiento de pared
f_w	Función de arrugas de pared
f_{wd}	Función deseada de arrugas de pared
$f_w O$	Función óptima de arrugas de pared
I	Momento de inercia
K	Parámetro geométrico $K = \ln \frac{R+r}{R+r \cos \alpha}$
K^1	Coeficiente que relaciona q_T y Δ_c
l	Longitud del mandril
l_i	Longitud inicial del tubo
M	Momento de doblado
P	Carga entre los dados soporte y de presión
P_i	Presión interna

Continuación

P_i^{inf}	Presión interna mínima
P_i^{sup}	Presión interna máxima
P_{Mi}	Porción de la carga P , soportada por el mandril
P_{Ti}	Porción de la carga P , soportada por el tubo
P_1	Carga entre los dados mordaza y de segmento recto del dado curvo
q	Carga P entre longitud l del mandril
q_M	Porción de la carga q que soporta el mandril
q_T	Porción de la carga q que soporta la pared del tubo
r	Radio medio inicial del tubo
r_i	Radio del orificio interno del tubo
r_m	Radio del mandril
r_α	Radio del tubo en un sector de la curva a cierto ángulo α
r_π	Radio del tubo en donde $\alpha = \pi$
$r_{\pi/2}$	Radio del tubo en donde $\alpha = \pi/2$
r_0	Radio del tubo en donde $\alpha = 0$
R	Radio de doblado o radio del dado curvo.
t	Espesor inicial de la pared del tubo
t_α	Espesor del tubo en un sector de la curva a cierto ángulo α
WF	Factor de pared
y	Distancia vertical entre el segmento elemental y el centro del tubo
Y	Límite de fluencia del material de trabajo

Continuación

Z Función de optimización

Caracteres griegos

α Ángulo que define la posición del elemental segmento en el tubo

β Ángulo de transición

γ Angulo de doblado después de la recuperación elástica.

γ_0 Angulo de doblado antes de la recuperación elástica.

Δ_c Holgura entre el diámetro interno del tubo y el mandril

ΔP_i Intervalos seleccionados en el software de la presión interna

$\Delta\sigma_{xf}$ Intervalos seleccionados en el software de la carga axial

ε_c Deformación circunferencial

ε_r Deformación radial

ε_x Deformación axial

ε_{xf} Deformación axial inducida por la carga axial

ε_{xm} Deformación axial inducida por el momento de doblado

θ Ángulo del doblado

ϑ Ángulo de la pendiente K^1

μ Coeficiente de Poisson

ρ Radio equivalente de contacto

σ_x Esfuerzo axial en el tubo

σ_{xm} Esfuerzo axial en el tubo inducido por el momento del doblado

σ_{xf} Esfuerzo axial en el tubo inducido por la carga axial

Continuación

σ_{xf}^{inf}	Esfuerzo axial mínimo en el tubo inducido por la carga axial
σ_{xf}^{sup}	Esfuerzo axial máximo en el tubo inducido por la carga axial
σ_{cp}	Esfuerzo circunferencial en el tubo inducido por la presión interna
σ_H	Esfuerzo superficial
σ_r	Esfuerzo radial en el tubo
σ_{xp}	Esfuerzo axial en el tubo inducido por la presión interna
φ	Ángulo que define la posición del eje neutro en la curva

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre	Página
1.1	Algunos métodos de doblado de tubos	21
1.2	Desplazamiento del eje neutro a consecuencia de la aplicación de la carga axial	23
1.3	Herramientas que intervienen en el proceso de doblado de tubos por arrastre	28
1.4	Diferentes estilos de dados curvo para el doblado	39
1.5	Dados soportes con y sin insertos	31
1.6	Tipos de mandriles	31
1.7	Limitaciones técnicas en el doblado de tubos	32
1.8	Cargas necesarias en el doblado de tubos por arrastre	33
1.9	Defectos típicos en el proceso de doblado de tubos por arrastre	34
1.10	Máquinas para doblado de tubos	36
2.1	Sistema de coordenadas del análisis de flexión (a) plano de flexión, (b) sección transversal del tubo	53
2.2. a	Diagrama de cargas en el elemental segmento deformado	55
2.2. b	Cargas en el elemental segmento	55
2.3	Presión interna en el tubo	57
2.4	Esfuerzos producidos por la presión interna en el tubo	57
2.5	Esfuerzos axiales caso de aplicación solo de momento flector M	59
2.6	Desplazamiento del eje neutro debido a la aplicación de la carga axial	59

Continuación

2.7	Variación del espesor de la pared del tubo, con una presión interna constante $P_i = 16 \text{ Mpa}$, y variando el esfuerzo axial en $\sigma_{xf} = 30, 40 \text{ y } 50 \text{ Mpa}$	62
2.8	Variación del espesor de la pared del tubo, con una presión interna variable $P_i = 14, 16 \text{ y } 18 \text{ Mpa}$, y esfuerzo axial constante $\sigma_{xf} = 40 \text{ Mpa}$	62
2.9	Variación del radio del tubo, con una presión interna constante $P_i = 16 \text{ Mpa}$, y variando el esfuerzo axial en $\sigma_{xf} = 30, 40 \text{ y } 50 \text{ Mpa}$	62
2.10	Variación del radio del tubo, con una presión interna variable $P_i = 14, 16 \text{ y } 18 \text{ Mpa}$, y esfuerzo axial constante $\sigma_{xf} = 40 \text{ Mpa}$	62
2.11	Ángulos y radios en la recuperación elástica	63
2.12	Sectores de desviación de la línea neutra	64
2.13	Diámetros medidos experimentalmente en la curva del tubo	68
2.14	Variaciones del radio medio de un tubo	68
2.15	Variaciones de las holguras de los mandriles	71
2.16	Holgura y excentricidad entre el tubo y el mandril	73
2.17	Carga por unidad de longitud q y esfuerzo superficial σ_H entre el mandril y la superficie interne del tubo	73
2.18	Relación q_T y Δ_c	74
2.19	Relación q_T y Δ_c obtenida en el Solid Simulation 2010	74

Continuación

3.1	Estructura Central del algoritmo	88
3.2	Determinación de segmentos de los intervalos	89
3.3	Eliminación de segmentos de los intervalos	89
3.4	Procedimiento inicial del algoritmo	90
3.5	Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (acero 1020)	92
3.6	Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (acero 1020)	92
3.7	Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (acero 1020)	92
3.8	Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (cobre)	92
3.9	Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (cobre)	92
3.10	Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (cobre)	92
3.11	Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)	92
3.12	Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)	92
3.13	Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)	92
3.14	Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)	92
3.15	Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)	92
3.16	Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Página
2.1	Datos de las variables de coordinación para el software MATHEMATICAL	62
2.2	Mediciones hechas experimentalmente de los diámetros máximos y mínimos en tubos doblados de acero 1020	67
2.3	Mediciones obtenidas con ayuda del software Mathematical, en el doblado de un tubo de acero 1020, con las condiciones de la figura 2.14	68
3.1	Valores de las restricciones	87
3.2	Variables de coordinación y límites de las variables de decisión para el doblado de tubo de diferentes materiales	91
3.3	Resultados de las corridas del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de acero 1020	94
3.4	Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de acero 1020	94
3.5	Resultados de las corridas del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de cobre 2.0090 (Cu DHP) para deformación en frío	95
3.6	Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de cobre 2.0090 (Cu DHP) para deformación en frío	95

Continuación

3.7	Resultados de las corridas del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de de aluminio 3.0517 (EN-AW 3003)	96
3.8	Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de aluminio 3.0517 (EN-AW 3003)	96
3.9	Resultados de las corridas del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de acero inoxidable al cromo	97
3.10	Tabla 3.10 Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de acero inoxidable al cromo	97

INTRODUCCIÓN

Los procesos de doblado datan de la misma época del inicio de la edad de los metales, que nace en la Península de Anatolia a partir del 5.000 a.C. De allí se difunde a Mesopotamia y Egipto, [1] a partir de entonces toda la evolución histórica del desarrollo de la sociedad humana ha estado estrechamente vinculada a las actividades de la metalurgia y los procesos de conformado metálico.

En el año 2011, la producción global de acero creció 7% interanual en el mes de marzo, según datos de la Asociación Mundial del Acero y la producción de acero crudo de China, uno de los mayores productores del mundo, creció en 9%, a 59,4 millones de toneladas [2]. En Venezuela en el año 2002 el volumen de exportaciones de acero alcanzó 2,3 millones de toneladas [3] y La Cooperación Tecnológica China-Venezuela permitirá el incremento de la producción de hierro y acero en el año 2011[4], se espera una producción de 4 millones de toneladas de acero líquido para fin de año, para tal fin se puso en marcha un plan de inversiones, gracias a un fondo financiero creado con ese país, que permitirá realizar mejoras estructurales.

La importancia actual de los procesos de la manufactura basados en el flujo plástico, puede apreciarse si se consideran algunos de sus productos. De la producción total anual de los Estados Unidos, 100 millones de toneladas de acero, casi el 10% se utiliza como fundiciones, y el restante 90% sufre deformación de alguna clase, principiando en casi todos los casos con una operación de rolado en caliente. Para la mayoría de los productos, las operaciones adicionales de forja o rolado en caliente incluyen el flujo plástico. Más de 25 millones de toneladas se producen como placa rolada en frío o lámina, las cuales son la materia prima para las operaciones de trabajo en prensa, en las que la deformación adicional en flujo plástico interviene en la alta producción de artículos de consumo tales como automóviles y aparatos domésticos. Estos 25 millones de toneladas son superiores al total de todos los metales no ferrosos y plásticos producidos al año. [5]

El aluminio es segundo metal más utilizado en el mundo después del hierro, es ampliamente utilizado para la producción de productos tubulares, gracias a sus excelentes propiedades químicas y su bajo peso específico. La geografía de la producción de aluminio está dominada por grandes empresas tales como Alcan, Alcoa, Reynolds, Kaiser, Pechiney. La industria del aluminio, por su costo es una industria generalmente de países desarrollados. Los mayores productores mundiales son Estados Unidos (4 Mt.) y países de la antigua U.R.S.S. (casi 2,5 Mt.). Ambos aportan más del 35% de una producción mundial que supera los 18 Mt. Entre los más grandes productores se sitúan también Canadá y Noruega, gracias a su potencia hidroeléctrica, Australia que se beneficia de sus ricos yacimientos de bauxita, y también Alemania. Francia, que desempeñó papel pionero, ocupa hoy un lugar mucho más modesto. Brasil y Venezuela, en América Latina, son los productores más importantes [6]. En Venezuela es el tercer sector generador de divisas (1

400 Millones US \$), con una producción de 240 TM anual y genera 8 400 puestos de trabajo [7], los más grandes yacimientos de aluminio en Venezuela se encuentran en el estado Bolívar [8].

Las tuberías de cobre son ampliamente utilizadas en la industria de la refrigeración, aires acondicionados, tubos para gases medicinales y terapéuticos, para elaboración de serpentines de transferencia de calor, debido a su excelente conductividad térmica [9]. En Venezuela existen yacimientos de cobre en los estados Yaracuy, en la Cordillera de la Costa, en la Sierra de Perijá y en el Sistema Andino.

En la actualidad los procesos de doblado de tubos, al igual que todos los demás procesos de producción, se encuentran bajo gran presión debido a la globalización del mercado, al corto ciclo de vida de los productos, la alta demanda de calidad y los cortos plazos de entrega [10].

Algunos de los procesos de conformado plástico más comunes son: laminado, forjado, extrusión, estirado, doblado, embutido, corte, hidroformado y otros.

Existen muchos métodos diferentes para el doblado de tubos, como por ejemplo el método del doblado de tubos por acumulación de deformación, doblado de tubos sin mandril interno para radios de doblado relativamente grandes denominado doblado por compresión e inclusive existe un método de doblado de tubos por láser en donde la inducción térmica del láser es usada para doblar tubos sin herramientas pesadas o fuerzas externas [11]. En el presente trabajo se hace referencia a los procesos de doblado de tubos en dobladoras por el método de arrastre.

El presente trabajo de investigación **Optimización Multiobjetivo de los Parámetros que intervienen en los Procesos de Doblado de Tubos Metálicos por el Método de Arrastre** está enmarcado en el campo de la línea de investigación Deformación Plástica.

Situación problemática: Generalmente en las empresas que se dedican a la fabricación de estructuras metálicas para pupitres, sillas, escritorios, así como también diversas estructuras en la industria automotriz y aeronáutica entre otras, desarrollan sus prototipos con métodos ineficientes y en ocasiones por métodos de ensayo y error, [12-17] Tales procedimientos no les permiten obtener la geometría correcta de productos en un tiempo mínimo, y con la mínima cantidad de defectos, ya que en el proceso no están adecuadamente evaluadas las cargas. En muchas ocasiones las máquinas deben ser reiniciadas antes de comenzar una nueva producción [17]. En ocasiones es necesario determinar por métodos de ensayo y error el herramental adecuado para cada caso con la finalidad de evitar los defectos típicos del doblado (arrugas en el interior de la curva, aplanamiento y excesivo adelgazamiento de la pared externa de la curva. [13-15, 18-24].

Sobre esta base, el **problema científico** queda definido de la siguiente forma:

¿Cómo disminuir el índice de defectos en el proceso de doblado de tubos cilíndricos metálicos en máquinas dobladoras por arrastre?

Objeto de estudio, el proceso de doblado de tubos.

El campo abarca el estudio del proceso de doblado de tubos metálicos cilíndricos, en máquinas dobladoras por arrastre.

Objetivo general:

Desarrollar un modelo de optimización multiobjetivo del proceso de doblado de tubos metálicos cilíndricos en máquinas dobladoras por arrastre.

Los objetivos específicos que se plantean son los siguientes:

1. Desarrollar los procedimientos matemáticos que garanticen la interrelación entre los parámetros geométricos del tubo, propiedades mecánicas del material, las cargas y los defectos que se producen en el proceso.
2. implementar un modelo de optimización que relacionen las cargas y la geometría de los tubos y de las herramientas, y las propiedades mecánicas del material del tubo para la obtención de los parámetros óptimos de carga en el proceso de doblado.
3. Validar del modelo de optimización.

Tareas de la investigación: las tareas que se plantean en el siguiente tema de investigación son:

1. Revisar la bibliografía relacionada con el tema.
2. Consultar a expertos.
3. Determinar los parámetros de carga para el doblado de tubos por arrastre.
4. Determinar las fallas típicas que aparecen en el proceso de doblado de tubos en dobladoras por arrastre.
5. Desarrollar los procedimientos matemáticos que relacionen los parámetros geométricos y de carga con los defectos del doblado.
6. Determinar el modelo de optimización para la obtención de los parámetros óptimos de carga del proceso de doblado.

7. Definir y desarrollar la etapa de experimentación para la validación del modelo de optimización.

Hipótesis:

El desarrollo de un modelo de optimización (para el proceso de doblado de tubos cilíndricos metálicos en máquinas dobladoras por arrastre), que integre el análisis de los parámetros geométricos (del tubo y las herramientas) y de cargas y las propiedades mecánicas del material de trabajo, permitirá la disminución del surgimiento de defectos durante el proceso de doblado.

La novedad científica

1. Nuevas expresiones para evaluar los defectos de adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas en el proceso de doblado de tubos por arrastre.
2. Evaluación simultánea de la carga axial y la presión interna sobre los defectos tres defectos.
3. Determinación de los intervalos de las cargas que intervienen en el proceso.
4. Determinación de la relación entre la magnitud de la presión interna y la holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo.
5. Implementación del modelo de optimización.

Métodos de investigación [25-28]**Métodos Teóricos:****El Análisis y la Síntesis:**

Análisis: Con este método se hace un análisis por separado de cada una de los diferentes aspectos que influyen en el comportamiento elastoplástico del material, la geometría del

tubo, las cargas necesarias para el doblado y su relación con el surgimiento de defectos.

La Síntesis: Los resultados obtenidos en el análisis se relacionan en ecuaciones y leyes generalizadas para cada caso en particular. Se establece una relación matemática entre las cargas aplicadas al doblado de tubos, la geometría y el material de estos y los posibles defectos y resultados que se obtienen.

La Abstracción: con este método se trata de comprender la relación entre los diferentes fenómenos sujetos a estudio. Se da explicación a fenómenos relacionados con el comportamiento elastoplástico de los tubos metálicos tales como las deformaciones y los posibles defectos que ocurren en el doblado.

La Inducción y la Deducción:

La Inducción: con la ayuda de este método se llega de hechos singulares a los generales y la formulación de la hipótesis. Es necesario determinar todos los elementos que conforman el estudio del comportamiento elastoplástico del material y la interrelación de todos los fenómenos que ocurren durante el doblado de tubos. Existen teorías ya demostradas para diferentes cálculos de otros métodos de doblado que pueden inducir a cálculos análogos en el método por arrastre.

La Deducción: se apoya en aseveraciones y generalidades que conllevan a demostraciones particulares. Debe llevar a conclusiones particulares que permitan establecer las ecuaciones teóricas para el cálculo de los intervalos de cargas límites, y la relación de éstas con las dimensiones, geometría, y propiedades mecánicas del material de trabajo y posibles defectos al final del proceso. Con este método se logra establecer cuales teorías utilizar, ya que existen contradicciones y errores al respecto en la bibliografía consultada.

Método Histórico lógico

El método histórico es tal vez el más importante y el punto de partida para todas las investigaciones, consiste en el estudio de todos los conocimientos relacionados con el tema de investigación tales como tesis doctorales relacionadas con la deformación plástica, publicaciones en revistas, consultas a expertos, conferencias, libros, otras además de la experiencia propia.

El método lógico Investiga leyes generales y conexiones esenciales. Se espera poder establecer leyes que establezcan la relación entre la magnitud de las cargas necesarias para el doblado de tubos y los fenómenos que ocasionan los defectos.

Método Hipotético – Deductivo

Con este método se establece la hipótesis de la investigación relacionada con los posibles resultados.

Método de la Modelación

Creación de abstracciones para explicar la realidad. Se hace la modelación más conveniente del proceso de doblado que ilustra virtualmente el proceso de deformación en el tubo y los diferentes esfuerzos a los que es sometido, las deformaciones y variaciones de espesor de pared, de radio y posible surgimiento de arrugas. Para tal fin se elabora un algoritmo de optimización y se corre en el MATHEMATICAL 7 se valida el modelo de optimización multiobjetivo por el método de Chevichev con el software del MATHEMATICAL 7.

Método Sistémico

Modela el doblado de los tubos mediante la determinación de los componentes que determinan el comportamiento elastoplástico del material, tales como son las cargas, la geometría y las propiedades mecánicas del material de trabajo, así como la relación entre los diferentes factores que determinan los resultados.

Método Dialéctico

Revela en el objeto no sólo las relaciones entre los componentes del sistema, sino aquellos elementos que son contradictorios entre sí, y que como consecuencia de las contradicciones se convierten en fuente desarrollo del propio objeto. Con la ayuda de este método se parte de la observación del proceso al análisis matemático, luego al establecimiento de la influencia que tienen en el proceso las cargas, la geometría del doblado y las propiedades mecánicas del material en los resultados de las deformaciones. Encontrar esas relaciones posibilita explicar los cambios cuantitativos y cualitativos que pueden dar lugar a un nuevo objeto.

Método Empírico

Revela y explica las características fenomenológicas del objeto. Se emplea, básicamente, en la primera etapa (de acumulación de información empírica) y en la tercera (de comprobación experimental de la hipótesis). Este método es utilizado para la determinación de las elongaciones de las curvas en el proceso, con ayuda de las cuales se calcula el desplazamiento del eje neutro y con este valor se determina los valores promedio del esfuerzo axial y la presión interna necesarias para el doblado.

Método de Observación Científica

Consiste en la percepción directa del objeto de investigación. Constituye el instrumento universal del investigador. Este método es empleado en la observación del comportamiento de las deformaciones mediante la variación de las cargas que intervienen en el proceso en múltiples experimentaciones.

El Método Experimental (el experimento)

Es el más complejo y eficaz de los métodos empíricos. Surge como resultado del desarrollo

de la técnica y el conocimiento humano, en la actividad transformadora del hombre penetrando en lo desconocido. El investigador crea las condiciones o adecua las existentes en el estudio de las propiedades y relaciones del objeto. El método experimental sirve para evaluar las hipótesis establecidas inicialmente. Con la ayuda de este método se puede hacer variaciones geométricas y de cargas, para el estudio del efecto que esto produce en los resultados del doblado de tubos.

El Método de la Medición

Se desarrolla con el objetivo de obtener información numérica acerca de una propiedad o cualidad del objeto o fenómeno (se comparan magnitudes medibles y conocidas, según una unidad de medida tales como espesores de pared y radio del tubo en la curva). En el caso de la presente investigación con ayuda de éste método se pueden medir también los resultados de las elongaciones de las curvas y las recuperaciones elásticas angulares y longitudinales, para luego ser comparadas con los resultados teóricos.

Tipo de investigación [26, 27]

Exploratoria: Se trata de encontrar uno o varios desarrollos teóricos capaces de facilitar las herramientas de cálculo necesarias para determinar los valores óptimos de las cargas para la obtención del resultado con una mínima cantidad de defectos.

Descriptiva: Con el estudio descriptivo debe determinarse inicialmente el valor apropiado de las posibles variables para la realización del estudio, así como también los resultados esperados.

Correlacional: En la experimentación del doblado se puede observar cómo va a comportarse un resultado del estudio de una variable determinada respecto a otra variable, de acuerdo con los resultados de otras experimentaciones hechas previamente.

Explicativa: Se trata de explicar el comportamiento de los resultados de la investigación. Debe desarrollarse una teoría que explique y relacione los efectos que las diferentes variables que intervienen en el proceso de doblado de tubos tienen con resultados obtenidos.

Se considera que la presente investigación tiene **importancia en la actualidad**, ya que el proceso de doblado de tubos se haya muy difundido en la fabricación de diversas estructuras y también tiene gran aplicabilidad en la industria automotriz, aeronáutica, aeroespacial y tubos para gasoductos, oleoductos, acueductos.

CAPÍTULO I

1. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL DEL PROCESO DE DOBLADO

1.1 Generalidades. Fundamentos de la deformación Plástica

El conformado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se utiliza la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas, [29]. La deformación ocurre cuando los esfuerzos aplicados a una pieza por medio de una herramienta exceden el límite elástico del material. Las propiedades convenientes para el conformado son la baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Los trabajos en caliente se realizan a temperaturas por encima de la temperatura de re cristalización y los llevados a cabo por debajo de esa temperatura se denominan trabajos en frío. La velocidad de la formación y la fricción son factores también influyentes en los procesos de conformado de metales. [5, 30-34]

Algunos de los procesos de conformado plástico son:

Laminado: proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una placa se reduce con ayuda de herramientas cilíndricas denominadas rodillos.

Forjado: se comprime una pieza de trabajo entre dos dados opuestos, la forma de los dados determina la forma de la pieza (se realiza generalmente en caliente).

Extrusión: proceso de compresión mediante el cual la fuerza de trabajo obliga a fluir el material de la pieza a través de una abertura en un dado con tamaño y forma conveniente

(se realiza generalmente en caliente).

Estirado: el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira de él a través de una abertura en un dado.

Embutido: consiste en la transformación de una lámina plana en una pieza en forma de copa.

Corte: implica la separación de una porción de una lámina de metal a través de un proceso de perforado o cizallado, con ayuda de herramientas denominadas punzón y dado.

Doblado: implica la deformación de una lámina, placa o tubo metálico para que adopte un ángulo respecto a un eje recto.

1.2 El proceso de doblado

El proceso de doblado es la variación de posición de una parte de una pieza (chapa, barra, tubo, perfil) respecto a otra parte de la misma pieza, [29] para lograr esto es necesario proporcionarle a la pieza un momento flector que produzca tensiones en la pieza que sobrepasen en límite elástico.

Dentro de las operaciones de doblado están incluidas las siguientes:

- Doblado simple: se refiere generalmente al doblado de láminas por medio de un troquel a un determinado ángulo y cierto radio predeterminado.
- Enrollado (curvado): operación simple de doblado mediante el cual se enrolla el borde de una chapa.
- Rebordeado (pestañado o bordoneado): enrollado progresivo de un borde circular mediante herramientas de la misma forma, sirve para aumentar la rigidez de las piezas.

- Perfilado: consiste en transformar una tira o chapa plana en una pieza alargada con un determinado perfil.
- Engrapado: operación mediante la cual se unen los extremos curvados o doblados de dos piezas separadas.

Los procesos de doblado son objeto de estudio en muchas investigaciones en donde se investigan diferentes problemas relacionados con aspectos tales como los parámetros geométricos críticos, las cargas [22, 35-43] necesarias para realizar las operaciones [43-46], las recuperaciones elásticas [17, 47-55] las elongaciones, [17, 35] esfuerzos residuales [56, 57], las limitaciones de cada uno de los procesos [56], el campo de utilización [30, 51, 56, 58], influencia entre las propiedades mecánicas del material y el tratamiento térmico previo [59], defectos y variaciones geométricas que surgen en el proceso de doblado [13, 23, 36-40, 43, 44, 60-71].

Los procesos de doblados de tubos están muy relacionados con la producción de tuberías para acueductos, oleoductos, gasoductos, tuberías eléctricas y además también con la industria automotriz, aeronáutica y aeroespacial, [17, 23, 43, 60, 61, 69, 72] Las tuberías sometidas a procesos de doblado deben ser hechas necesariamente de materiales dúctiles, tales como aceros de bajo y medio carbono, algunos aceros de baja aleación, aceros inoxidables, algunas aleaciones de aluminio y cobre [29, 30, 73-75].

Rossi [76] hace referencia a los factores necesarios a considerar en los procesos de doblado en general, tales como: a) radio de la curvatura y la elasticidad del material, b) fijar los radios de curvatura inferiores, iguales o mayores al espesor de la chapa a doblar con el fin de no estirar excesivamente la fibra exterior y para garantizar un doblado sin rotura. Aunque Rossi no hace referencia a los procesos de doblado de tubos, hace una serie de

análisis que deben ser tomados en cuenta para el cálculo del desplazamiento de la línea neutra y de los esfuerzos en los diferentes puntos en la sección del tubo sometido a doblado. También se refiere al cálculo de la longitud inicial de la lámina, el cual está muy relacionado con el cálculo de la longitud inicial para tubos.

García [51] realiza un estudio acerca del fenómeno de la recuperación elástica en los procesos de doblado en chapas metálicas, estableciendo la relación entre este fenómeno y la geometría del doblado, las propiedades mecánicas del material de trabajo y la magnitud del ángulo del doblado. En el trabajo de García no se hace referencia a los procesos de doblado de tubos.

Moore [5] hace consideraciones generales de los procesos de doblado de láminas que relacionan las propiedades mecánicas de los materiales, radio mínimo de doblado y espesor de la lámina. Moore no hace referencia a procesos de doblado de tubos, aunque el cálculo de la longitud se asemeja al de los tubos doblados.

De-Garmo [30] plantea que el doblado es la deformación plástica de un metal sobre un eje lineal con cambios pequeños o grandes en el área de la superficie de trabajo. Múltiples doblados pueden ser hechos simultáneamente, pero para ser clasificados como doblados verdaderos y tratados como doblados simples, cada eje debe ser lineal e independiente de otros. Si múltiples doblados son hechos con un dado simple el proceso entonces se llama formado. El doblado simple causa compresión en la parte interna del doblez y tracción en la parte externa. Los esfuerzos a tracción y compresión pueden ocasionar una distorsión significativa en los bordes de la superficie cuando se termina el doblado. Otro fenómeno que estudia es el efecto de la recuperación elástica una vez que se hayan retirado las cargas

que produjeron el doblado. De-Garmo hace una somera descripción de los métodos de doblado de tubos por arrastre, compresión y pistón.

Mallo [29] establece consideraciones teóricas para los diferentes tipos de doblado, tales como las deformaciones plásticas, los esfuerzos y la relación entre el momento necesario para el doblado y la geometría de la pieza de trabajo, así como también algunas consideraciones acerca del radio mínimo del doblado. En dicho trabajo no se hace referencia a procesos de doblado de tubos, no obstante, los aspectos teóricos planteados están relacionados con las ecuaciones para el cálculo del momento flector necesario para el doblado de tubos y el cálculo del desarrollo previo de la longitud inicial y de la recuperación elástica.

1.3 El proceso de doblado de tubos y tuberías

Existe una gran variedad de métodos para doblado de tubos y cada uno de ellos alberga una serie de particularidades que definen su campo de utilización. Los factores que determinan la selección del método de doblado están relacionados con las limitaciones geométricas del doblado, las limitaciones tecnológicas y la producción estimada de tubos a doblar.

Los procesos para doblado de tubos más comunes son:

- a) con pistón [77-79]
- b) por medio de rodillos [43, 79]
- c) por compresión [17, 22, 42, 79, 80]
- d) por rodillo rígido y cojín híper-elástico [81]
- e) tangencial [66, 67]
- f) por medio de troquel y mandril elastómero. [18, 82]
- g) libre [83, 84]

- h) por estiramiento flexión. [43]
- i) con relleno de arena caliente [79]
- j) por inducción caliente. [11]
- k) por arrastre, [13, 24, 35-40, 43, 44, 53, 61, 65, 69, 71, 79, 80, 83, 85-92]

Tales métodos de doblados se pueden observar en la figura 1.

En el método de **doblado por pistón** [77-79], utiliza un dado curvo que se empuja contra el tubo, que genera fuerzas mecánicas que producen el doblado, este método tiende a producir cierta forma ovalada en la sección transversal del tubo, se limita a doblados de producciones unitarias o hasta serie pequeña en tubos de pared gruesa y en aquellos casos en que no es muy importante la distorsión de la forma cilíndrica de la sección transversal. (Ver figura 1.1.a)

En el método de **doblado por rodillos** [79] consta de tres rodillos, uno de ellos se puede desplazar en dirección radial al radio de la curva para obtener el radio deseado. Este método es adecuado para la fabricación de tuberías helicoidales para aplicaciones de transferencia de calor. (Ver figura 1.1.b), este método se aplica en condiciones de producción unitaria, y se obtiene una mejor calidad de doblado que por el método del pistón.

En el **doblado por compresión** [17, 22, 42, 79, 80] la pieza se sujeta y se dobla alrededor de un dado estacionario con la ayuda de un bloque o un rodillo seguidor, tal como se observa en la figura 1.1.c. Este método es recomendable para producciones grandes, de doblado de tubos de pared relativamente gruesa y radio de doblado relativamente grande, el ángulo de doblado está limitado a 180 grados.

Jin [42] hace referencia a aspectos relacionados con la geometría, las cargas, los defectos en el proceso del doblado, las limitaciones y el campo de utilización del método de doblado de tubos por compresión.

Tang [22] emplea la teoría de la deformación plástica para el estudio del proceso de doblado de tubos por compresión, en ese estudio se desarrollan algunas ecuaciones prácticas para explicar los fenómenos en el doblado de tubos por compresión, tales como: 1) esfuerzos en el proceso de doblado, 2) variación del espesor de la pared del tubo, 3) tasa de reducción de la sección del tubo, 4) desviación del eje neutro, 5) cálculo de la longitud inicial de la curva, 6) cálculo del momento de flexión, y 7) aplanamiento de la pared del tubo en la parte externa de la curva.

Critchley [17] trata dos principales problemas: la recuperación elástica y la elongación axial. En la experimentación el autor establece la relación entre la elongación que experimentan las probetas y algunas variables estudiadas como son el material, el coeficiente plástico de Poisson, espesor y diámetros del tubo y el radio y ángulo de doblado. El estudio realizado por Critchley está orientado a tubos de diámetro pequeño (hasta 16 mm) y pared delgada y no contempla tales factores para tubos de mayor diámetro. El método de **doblado por medio de rodillo rígido y cojín híper-elástico** [81] es una técnica de doblado flexible, la cual pertenece al grupo de las tecnologías de doblado cinemático. Este nuevo proceso permite el formado espacial de tubos con variables de radio de doblado y un incremento residual de doblado, los tubos son deformados entre un rodillo rígido y un cojín hiperelástico de poliuretano, ver figura 1.1.d.

En el método de **doblado tangencial** [66, 67] intervienen tres dados, uno fijo, otro movable y uno que empuja el tubo y dos mandriles internos tal como se ilustra en la figura 1.1.e, con

este método se puede obtener radios de doblado pequeños. Este método se utiliza para casos en donde se dispone de poco espacio entre las piezas que intervienen en el ensamblaje.

En el método de doblado por **troquel y mandril elastómero** [18, 82] intervienen un troquel, un mandril hiperelástico y un dado que empuja el tubo a la zona de conformado, ver figura 1.1.f.

El método de **doblado libre** [83, 84] es una tecnología con la cual se puede obtener casi cualquier geometría y tiene un amplio campo de aplicaciones, especialmente en la industria automotriz. En el proceso intervienen tres principales herramientas, una guía, un dado de doblado y un anillo, ver figura 1.1.g. No se recomienda este método para tubos de pared delgada, ya que la ausencia de mandril interno podría hacer deformar de manera indeseable al tubo.

En el método de **doblado por estiramiento y flexión** [44] intervienen un dado curvo que proporciona un momento flector y una carga axial producidas por dos dados de agarre, está limitado a grandes radios de doblado por la posible distorsión de la sección transversal del tubo. Ver figura 1.1.h.

El método de **doblado por inducción caliente** [79] fue originalmente utilizado durante la segunda guerra mundial, es utilizado para doblar tubos de gran diámetro calentándolos a temperaturas entre 427 y 1205 grados centígrados de acuerdo al tipo de material. Este método es utilizado para tuberías de la industria petrolera.

Wenchuan [11] hace un estudio del proceso de doblado de tubos por láser que consiste en la distorsión térmica inducida, con la cual no se requiere de herramientas pesadas ni de fuerzas externas para el proceso del doblado de tubos.

El trabajo de Wenchuan acerca del doblado de tubos por láser está orientado a procesos eventuales de casos particulares y de producciones pequeñas y diámetros grandes, el método de doblado por láser no es aplicable a procesos de producción masiva o en serie.

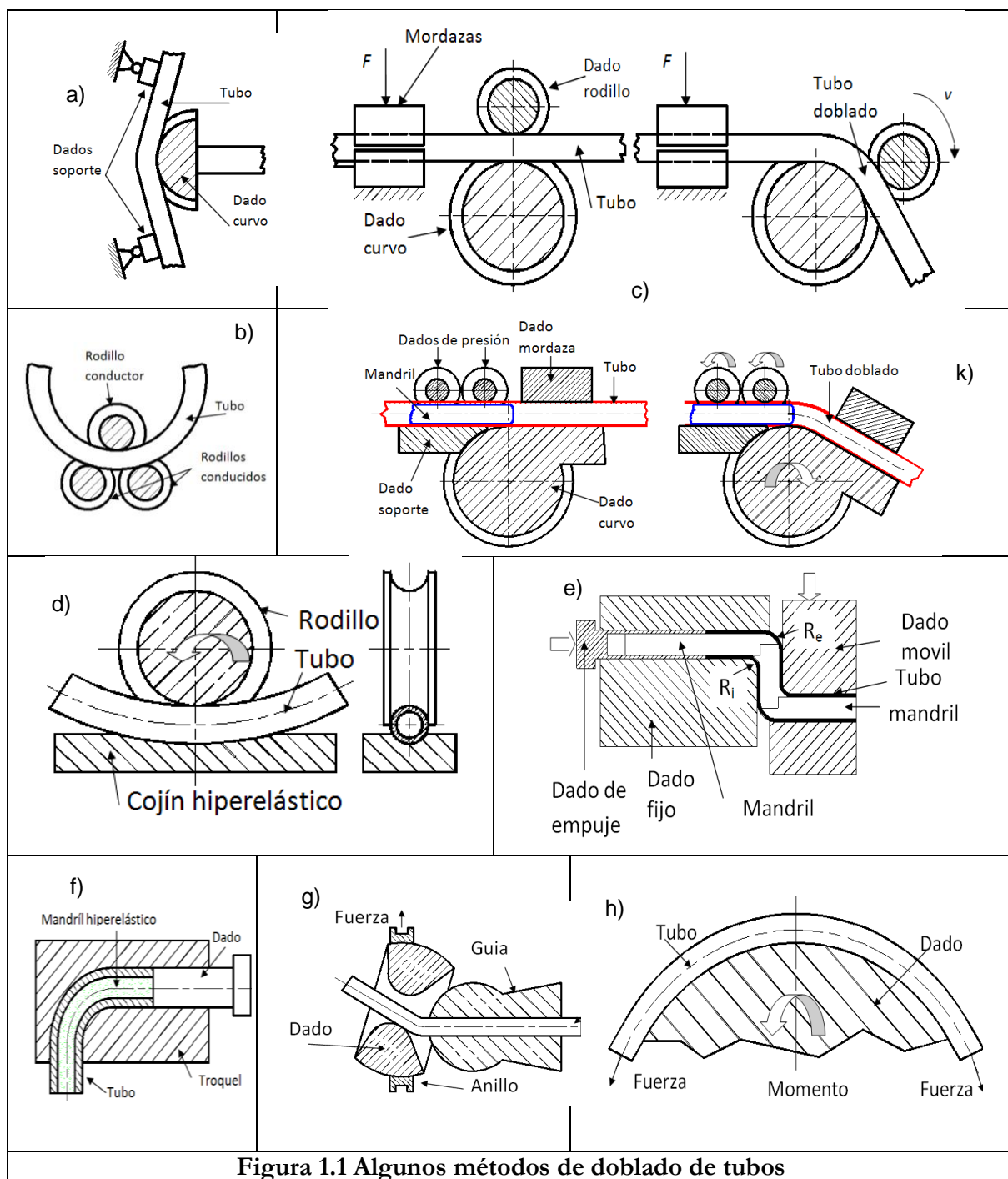
El método **doblado con arena caliente** [79] consiste en el relleno del tubo con arena caliente a unos 870 grados centígrados para su posterior doblado. Este método se limita a operaciones de doblado eventuales, de producción unitaria, y de exigencias de precisión no muy grandes para los cuales no se justifica la adquisición de un herramental costoso.

El **doblado por arrastre**, [13, 24, 35-38, 43, 44, 53, 61, 65, 69, 79, 80, 83, 85-93] se ha aplicado desde los días en que las máquinas dobladoras manuales trabajaban con herramientas hechas de madera [80]. Con tecnología de hoy, una curva con grado de doblado (*DOB*) igual a 1 es común, e incluso las curvas $DOB < 1$ son posibles. Con el método de doblado por arrastre se pueden hacer curvas compuestas y complejas en máquinas CNC y tecnología del CAD/CAM. El tubo se sujeta contra un dado que tiene la forma del doblez como en el caso anterior, pero ahora el dado gira halando el tubo con ayuda de una matriz de presión conformada por el segmento recto del dado curvo y el dado mordaza, y en la mayoría de los casos con un mandril interno dentro del tubo, tal como se muestra en la figura 1.1.k [79]. Este método es recomendable para producciones grandes, de doblado de tubos de pared relativamente delgada y radio de doblado relativamente pequeño, el ángulo de doblado está limitado a 180 grados.

1.4 Método de doblado de tubos por arrastre

Orban [69] desarrolla un modelo por elementos finitos para simular el proceso de doblado de tubos para la detección de las arrugas. La evolución del desarrollo del indicador de

arrugas es correlacionada con la iniciación y crecimiento de arrugas en la simulación. Propone la introducción de una carga a compresión en el proceso de doblado para disminuir el fenómeno del adelgazamiento de la pared externa del tubo.



Dos modos de arrugas, antes de la entrada del material en el dado curvo y en la zona de doblado son identificados en diferentes condiciones de esfuerzos y de elongaciones. No considera la influencia que tiene la presión interna en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva en el tubo. No estudia el fenómeno de aplanamiento de la pared externa de la curva en el proceso de doblado.

Chunfeng [36] establece la relación entre la presión lateral y la distorsión de la sección transversal en perfiles LY12M (perfiles forma de sombrero) doblados por el método de arrastre. Strano [13] propone una metodología computarizada denominada Tube ProDes con la finalidad de facilitar el proceso de diseño de herramientas para el doblado de tubos por el método de arrastre, primeramente realiza un cálculo numérico para compensar el efecto de la recuperación elástica, y para evaluar la severidad del doblado, o sea el riesgo de ocurrencias de defectos, (aplanamiento y adelgazamiento en la parte externa y arrugas en la parte interna de la curva), luego el herramental es definido por lógica difusa al utilizar las propiedades mecánicas del material, la geometría del doblado y las diferentes variables como datos de entrada. En las ecuaciones para el cálculo del desplazamiento de la línea neutra y los radios mínimos de doblado no considera la influencia de la carga axial y la presión interna en el tubo.

Wang [43] desarrolla un modelo matemático basado en la teoría de la deformación plástica que relaciona la carga axial y la presión interna en el proceso de doblado del tubos por arrastre con las variaciones de espesor de pared y radio medio del tubo.

La ecuación establecida por Wang para determinar la variación del espesor de la pared del tubo en la sección transversal en la curva es:

$$t_{\alpha} = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K + 1) + \frac{P_i r}{2t}(K + 3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t}K} \left[\frac{r}{R}(\cos\alpha + \cos\varphi) \right] \right\} t \quad (mm) \quad 1.1$$

La ecuación establecida por Wang para determinar la variación del radio del tubo en la sección transversal en la curva es:

$$r_{\alpha} = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K - 1) + \frac{P_i r}{2t}(2K + 3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t}K} * \left[\frac{r}{R}(\cos\alpha + \cos\varphi) \right] \right\} r \quad (mm) \quad 1.2$$

Wang [43] no considera la influencia que tiene la carga axial, la presión interna, el factor de pared WF , y el material en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva del tubo. En la expresión para calcular el desplazamiento de la línea neutra comete un error al tomar el ángulo φ desde el eje vertical (ver figura 1.2) y otro error al utilizar la función coseno del ángulo en lugar del seno.

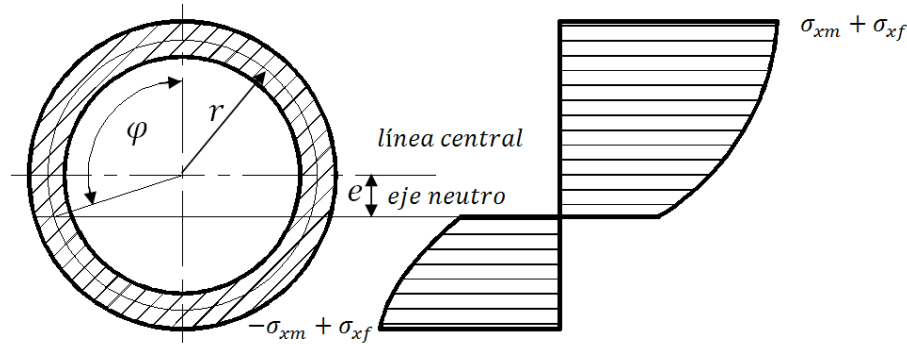


Figura 1.2 Desplazamiento del eje neutro a consecuencia de la aplicación de la carga axial [44]

Agarwal [44] utiliza el mismo modelo matemático de Wang, realiza una serie de experimentaciones en donde muestra las variaciones del espesor de la pared y el radio medio del tubo, al variar la presión interna y la carga axial. En algunas experimentaciones le asigna valores iguales a cero a la presión interna y a la carga axial, lo cual constituye un error, ya que la existencia de estas cargas determina la esencia del método de doblado por

arrastre. Tampoco considera la influencia que tiene la carga axial, la presión interna, el factor de pared WF , y el material del tubo en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva. También comete el mismo error de Wang en la expresión para calcular el desplazamiento de la línea neutra al tomar el ángulo φ desde el eje vertical (ver figura 1.2) y otro error al utilizar la función coseno del ángulo en lugar del seno.

La ecuación establecida por Agarwal para determinar la variación del espesor de la pared del tubo en la parte sometida a tracción en la sección transversal en la curva es:

$$t_{ae} = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K + 1) - \frac{P_i r}{2t}(K + 3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) - \frac{P_i r}{2t}K} \left[\frac{r}{R}(\cos\alpha + \cos\varphi) \right] \right\} t \quad (mm) \quad (1.3)$$

La ecuación establecida por Agarwal para determinar la variación del espesor de la pared del tubo en la parte sometida a compresión en la sección transversal en la curva es:

$$t_{ai} = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} - \sigma_{xf})(K + 1) - \frac{P_i r}{2t}(K + 3)}{(\sigma_{xm} - \sigma_{xf})(K - 2) - \frac{P_i r}{2t}K} \left[\frac{r}{R}(\cos\alpha + \cos\varphi) \right] \right\} t \quad (mm) \quad (1.4)$$

La ecuación establecida por Agarwal para determinar la variación del radio del tubo en la parte sometida a tracción en la sección transversal en la curva es:

$$r_{ae} = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K - 1) + \frac{P_i r}{t}\left(K + \frac{1}{2}\right)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t}K} \left[\frac{r}{R}(\cos\alpha + \cos\varphi) \right] \right\} r \quad (mm) \quad (1.5)$$

La ecuación establecida por Agarwal para determinar la variación del radio del tubo en la parte sometida a compresión en la sección transversal en la curva es:

$$r_{ai} = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} - \sigma_{xf})(2K - 1) - \frac{P_i r}{2t} \left(K + \frac{1}{2} \right)}{(\sigma_{xm} - \sigma_{xf})(K - 2) - \frac{P_i r}{2t} K} \left[\frac{r}{R} (\cos \alpha + \cos \varphi) \right] \right\} r \quad (mm) \quad (1.6)$$

Yang [24] propone una función de onda de arrugas para determinar el radio mínimo de curvatura de tubos doblados basado en el método energético. Además analiza los efectos de los parámetros que influyen en el radio mínimo de doblado, concluyendo que: (1) la influencia del ángulo de doblado en el radio mínimo del dado curvo es despreciable; (2) el efecto de las dimensiones geométricas y las propiedades del material de los tubos en el radio mínimo del dado curvo es significativamente grande; (3) el radio mínimo de doblado se hace más grande respecto al radio original con el incremento del coeficiente de endurecimiento por deformación del material de los tubos, mientras que el espesor de la pared y el exponente de endurecimiento por deformación decrecen. No considera la influencia que tiene la carga axial y la presión interna en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva en el tubo. No estudia los fenómenos de adelgazamiento y aplanamiento de la pared externa de la curva en el proceso de doblado.

Achimas [53] estudia la influencia del ángulo de doblado y el radio del dado curvo en el fenómeno de la recuperación elástica en los procesos de doblado de tubos por arrastre. No estudia los fenómenos de adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas en el proceso de doblado.

Wang [61] presenta un enfoque de una aproximación energética para proveer el mínimo radio de doblado para condición ante inicial de surgimiento de arrugas en el proceso de doblado por arrastre, como función de la geometría del tubo y herramientas utilizadas y las propiedades mecánicas del material de trabajo. Este enfoque proporciona una herramienta

de predicción que sirve para labores de diseño y optimización de parámetros de herramientas en el doblado por arrastre. No considera la influencia de la presión interna y la carga axial en el proceso de doblado, no estudia los fenómenos de aplanamiento y adelgazamiento de la pared externa de la curva.

Dong [88] estudia la relación existente entre la recuperación elástica y la distorsión de la forma de la sección transversal del tubo respecto a la carga a compresión entre los datos curvos y de presión en perfiles de sección forma de sombrero LY12M, con el fin de incrementar calidad y la eficiencia en la producción.

Bardelcik, [35] hace un estudio acerca de la relación entre la magnitud de la carga a compresión entre los datos de presión y soporte y la elongación del tubo en el doblado. Estudia además la variación del espesor de la pared del tubo en la sección longitudinal a lo largo de toda la curva, concluyendo que dicho espesor no se mantiene constante. No considera la influencia de la presión interna y la carga axial en el proceso de doblado. No plantea el fenómeno de surgimiento de arrugas y aplanamiento en la pared del tubo.

Mahanty [85] desarrolla un método por elementos finitos para la simulación de procesos de doblado de tubos por arrastre e hidroformado utilizando el ANSYS/ LS-DYNA. El método usado emplea dos modelos por elementos finitos, uno es un modelo paramétrico con más de 50 parámetros utilizados para la simulación del proceso de doblado, el segundo incluye las deformaciones y esfuerzos residuales y la variación de los espesores de la pared del tubo. No considera los fenómenos de surgimiento de arrugas y aplanamiento en la pared del tubo.

Gantner [83] desarrolla un método de simulación para los procesos complejos de doblado utilizando el programa de simulación LS-DYNA® con el objeto de reducir peso, consumo de combustible y costos en tubos doblados como proceso previo al proceso de

hidroformado. No estudia los fenómenos de surgimiento de arrugas, aplanamiento y afinamiento en la pared del tubo.

Lăzărescu [89, 90, 94] hace un estudio utilizando redes neuronales artificiales en donde propone un método para la determinación del surgimiento de algunos de los defectos típicos en el doblado de tubos, tales como la distorsión de la sección transversal, la recuperación elástica y la variación del espesor de la pared. No estudia el fenómeno de aplanamiento y formación de arrugas en la pared del tubo.

Zhao [87] estudia la influencia de la holgura entre el mandril y las dimensiones internas en tubos rectangulares de aluminio de pared delgada en el surgimiento de arrugas en la parte interna de la curva con ayuda de un modelo por elementos finitos en 3D utilizando el código explícito ABAQUS/Explicit, y valida los resultados con ensayos experimentales. Los experimentos muestran que con el incremento de la holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo el número de ondas de arrugas decrece rápidamente mientras la altura de las ondas se incrementa. La influencia de la holgura entre el dado soporte y el de presión no tienen gran relevancia en el fenómeno de la formación de la arruga. No establece la influencia de esa holgura en los fenómenos de aplanamiento y afinamiento de la pared del tubo.

Gang-yao [65] estudia la distorsión de sección transversal de los tubos rectangulares de aluminio de pared delgada sometidos a doblado por arrastre utilizando un modelo por elementos finitos en 3D basado en ABAQUS y luego validado experimentalmente.

Mentella [92] establece un modelo por elementos finitos capaz de tomar en cuenta las diferencias en la distribución del espesor inicial y propiedades mecánicas a lo largo del perfil de la sección transversal en tubos doblados y su relación con la forma resultante del

producto final. No considera la influencia que tienen en el proceso de doblado la presión interna y la carga axial.

1.4.1 Herramientas necesarias para el doblado de tubos por arrastre:

En todo proceso de doblado de tubos por arrastre es necesaria la intervención de las herramientas que se observan en la figura 1.3, [13, 23, 24, 43, 61, 69, 72, 80]. En el momento que un tubo es doblado, básicamente dos fenómenos suceden. La pared externa del tubo adelgaza, y el interior de la curva presenta arrugas. Se pueden obtener curvas satisfactorias sin utilizar mandril en doblados de tubos cuando son de pared gruesa y la curva es de radio grande. Cuando el radio de doblado es pequeño y la pared del tubo delgada es necesario la implementación de un mandril interno para disminuir el aplanamiento en la parte externa y las arrugas en la parte interna de la curva. En la calidad del doblado influye la calidad de las herramientas utilizadas y la lubricación que depende en gran medida del tipo de material del tubo.

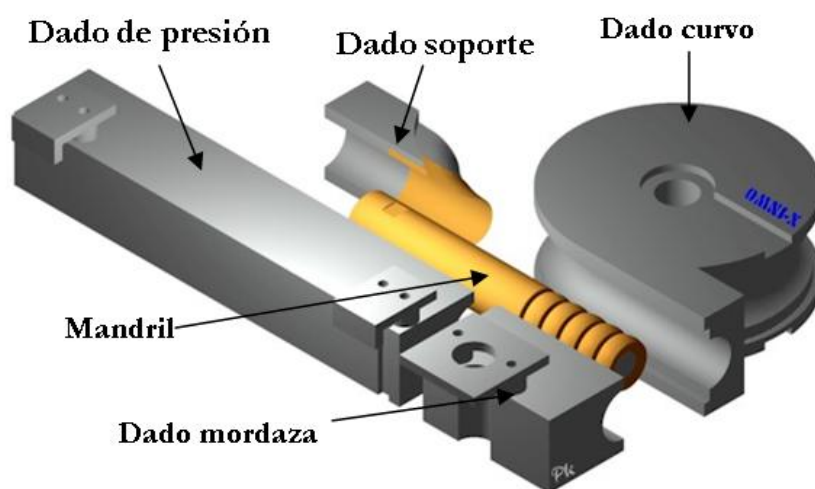


Figura 1.3 Herramientas que intervienen en el proceso de doblado de tubos por arrastre

Fuente: [13, 80]

Las herramientas necesarias para el doblado de tubos por arrastre son el dado curvo (alrededor de cuál se dobla el tubo), el dado mordaza, (que sostiene conjuntamente con el segmento recto del dado curvo el tubo en su lugar mientras que se dobla alrededor del dado de curvo), el dado de presión (que sigue o rueda el tubo mientras que se dobla alrededor del dado curvo), el dado soporte que conjuntamente con el dado de presión proporcionan la carga a tracción en el tubo mientras es doblado y el mandril que sirve como guía interna en el tubo para que éste no colapse hacia adentro.

El **dado curvo** [13, 80] es la herramienta primaria que determina el radio de curva del tubo. Se fabrica de acero de herramienta o de acero aleado y es sometido a un tratamiento térmico y/o nitrurado de acuerdo con los requisitos individuales. Los dados curvos están disponibles en diversos estilos. Los cinco estilos básicos se pueden ver en la figura 1.4. El estilo elegido depende del diámetro exterior del tubo y del radio de doblado R . Los cinco estilos de dados de mayor a menor radio son: 1) Carrete, 2) Una sola pieza, 3) Plataforma parcial, 4) Plataforma completa y 5) Reborde.

Un aspecto importante a considerar en todos los estilos es la longitud de la parte recta del dado curvo, esta longitud depende del uso, y se trata con chorro de arena para obtener la rugosidad deseada para mejor agarre, la longitud de la parte recta del dado curvo se selecciona de manera constructiva, si esta longitud es insuficiente el agarre es insuficiente, si la longitud es excesiva se limita la distancia entre curvas en piezas que tienen más de una operación de doblado.

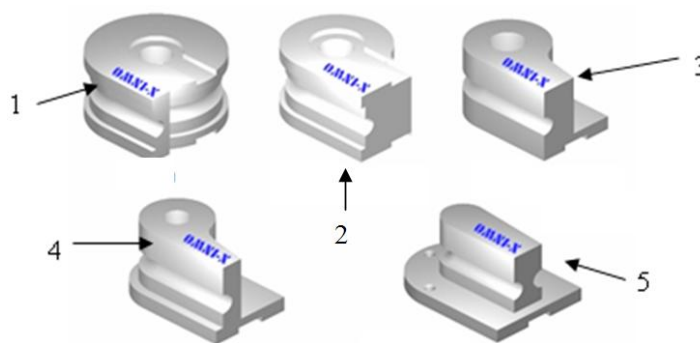


Figura 1.4 Diferentes estilos de dados para el doblado [80]

El **dado mordaza** [13, 80] presiona al tubo contra la parte recta del dato curvo, es de igual longitud que dicha parte recta, la función primaria del dado mordaza es sostener el tubo con seguridad conjuntamente con el dato curvo durante el doblado.

El **dado de presión** [13, 80] se utiliza para mantener una presión constante en el tubo en la tangente donde está ocurriendo el doblado, y proporciona conjuntamente con el dato soporte cierta fuerza a tracción F necesaria para realizar el proceso, proporciona además conjuntamente con el dato curvo y el dado mordaza, el momento necesario para el doblado M . La longitud del dato de presión depende del grado de doblado DOB de la pieza, que es la relación entre el radio del dato curvo y diámetro del tubo, siendo recomendable la mayor longitud para los menores DOB . En calidad de dato de presión suelen también utilizarse dos dados de forma circular que pueden girar durante el proceso de doblado. Estos dados se utilizan cuando se desea disminuir la complejidad del mecanismo.

El **dado soporte** [13, 80] conjuntamente con el dato de presión generan la carga axial F , lo cual es su función primaria además de disminuir las arrugas en el radio interior del tubo. El material del dato soporte es también un aspecto importante, el dato soporte de acero es preferible para el doblado de aluminio, cobre, o acero suave; el de aluminio-bronce se prefiere para doblar acero inoxidable. Los dados de acero pueden también ser de acero plata

para ayudar a reducir la fricción. La disposición apropiada del dado soporte es esencial para una buena curva y la durabilidad del dado.

Al igual que el dado curvo, existen varios estilos de los dados soportes a elegir según el uso, los dados con insertos de material antifricción proporcionan un trabajo más confiable y son más duraderos pero también son más costosos. En la figura 1.5 se puede observar algunos tipos de dados de soporte.

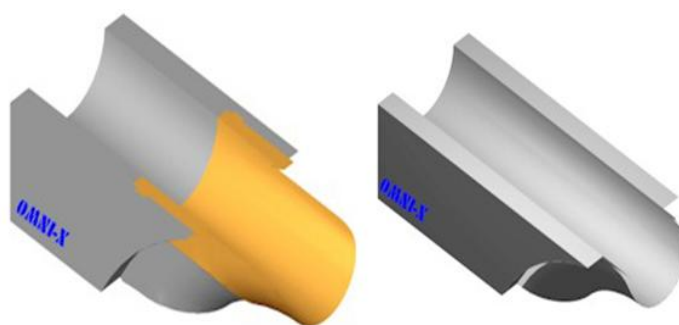


Figura 1.5 Dados soportes con y sin insertos [80]

Los **mandriles** [13, 80] se fabrican generalmente de los mismos materiales que el dado del soporte, pues ambos trabajan en análogas condiciones de fricción. La función primaria del mandril es evitar que la pared del tubo colapse hacia adentro. Elegir el mandril correcto es muy importante en la obtención de la calidad de la curva. Los diferentes tipos de mandriles pueden ser observados en la figura 1.6.

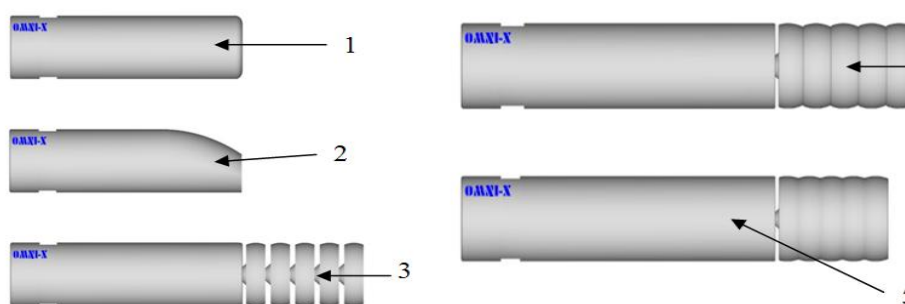


Figura 1.6 Tipos de mandriles [80]

Los cinco estilos básicos de los mandriles ilustrados en la figura 1.6 son:

- 1) Mandril de enchufe - usado para tubos de pared gruesa o radio de doblado grande.
- 2) Mandril curvado al extremo - para usos similares al mandril del enchufe pero con el extremo formado para emparejar el radio del tubo doblado CLR , (después de la recuperación elástica).
- 3) Mandril estándar, ampliamente utilizado porque cubre la gama más amplia de usos de doblado. Los mandriles estándares se hacen con una o varias bolas en el extremo de la curva que impiden el aplanamiento de la pared del tubo después de la salida de la zona de conformación.
- 4) Mandril para doblado de tubos de pared delgada.
- 5) Mandril para pared ultra delgada.

1.4.2 Campo de utilización del doblado de tubos por arrastre [80]

Como se puede ver en la figura 1.7, existe un campo donde se puede doblar tubos por este método sin la implementación del mandril interno, otro campo donde es necesario el mandril y otro campo donde el doblado resulta imposible.

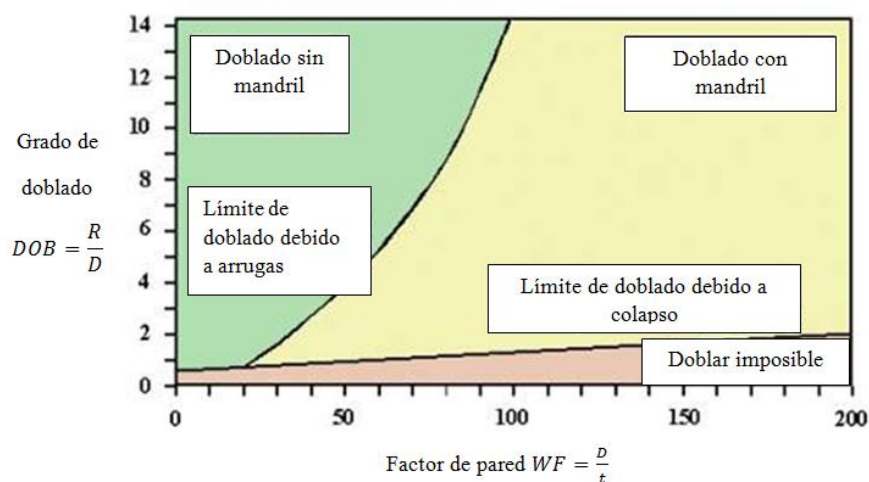


Figura 1.7 Limitaciones técnicas en el doblado de tubos [56]

Los valores de la abscisa el factor de pared WF representan la relación diámetro externo del tubo D entre el espesor de la pared del tubo t y los valores de la ordenada, grado de doblado DOB representan la relación radio del dado curvo R y el diámetro externo del tubo D .

1.4.3 Cargas y esfuerzos existentes en el proceso de doblado de tubos por arrastre [13, 43, 44]

En todo proceso de doblado de tubos por arrastre son necesarias las siguientes cargas: a) M -momento del doblado, a consecuencia de este momento se produce cierto esfuerzo en la sección transversal del tubo σ_{xm} el cual permite realizar el doblado, b) una carga de apriete P entre los dados de presión y soporte.

Y c) otra carga también de apriete P_1 entre el dado mordaza y la parte recta del dado curvo, estas dos últimas cargas producen por rozamiento la carga axial F en la misma sección y esta a su vez un esfuerzo axial σ_{xf} esencial para el doblado. El mandril proporciona un esfuerzo radial P_i contra la superficie interna del tubo que impide el colapso de éste hacia adentro y a consecuencia de todas estas cargas se produce también cierto esfuerzo circunferencial en el tubo σ_c , ver figura 1.8.

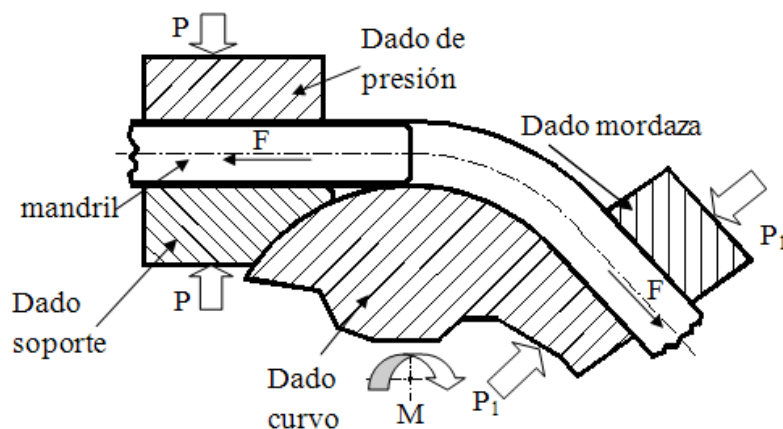


Fig. 1.8 Cargas necesarias en el doblado de tubos por arrastre

1.4.4 Defectos que ocurren en los procesos de doblado de tubos en dobladoras por arrastre

Muchos investigadores han realizado estudios destinados a los fenómenos relacionados con el surgimiento de fallas en los procesos de doblado de tubos por arrastre, los defectos típicos en el proceso de doblado son:

- 1) adelgazamiento en la pared externa de la curva, [13, 42, 43].
- 2) aplanamiento en la pared externa de la curva, [13, 42, 43].
- 3) formación de arrugas en la parte interna de la curva, [13, 23, 24, 42, 43, 60, 61, 72, 87]
- 4) diferencia de distancias entre curvas de doblado, [14],
- 5) diferencia de ángulos de doblado [14].
- 6) diferencia de planos de doblado [14].

Esos defectos se originan en parte a consecuencia de que no se controlan las cargas durante el proceso de doblado. Tales defectos se pueden observar en la figura 1.9.

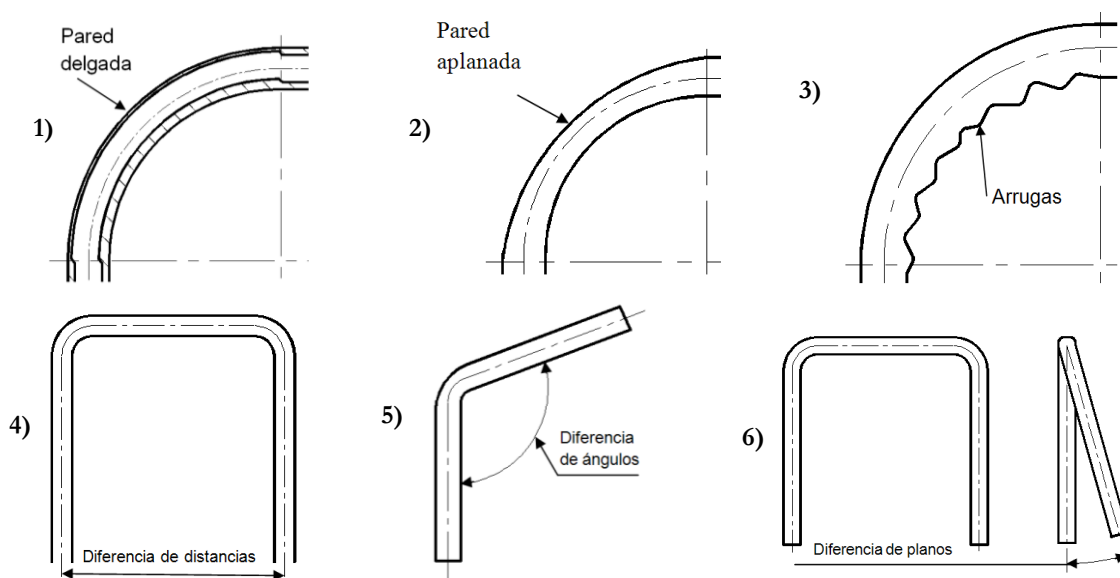


Fig. 1.9 Defectos típicos en el proceso de doblado de tubos por arrastre [13]

Estos defectos están relacionados con: a) las propiedades mecánicas del material de trabajo, b) el factor de pared $WF = D/t$, c) el grado de doblado $DOB = R/D$ y con d) la magnitud de los esfuerzos del doblado, tales esfuerzos son: σ_{xm} - esfuerzo producido por el momento flector de doblado σ_{xf} - esfuerzo producido por la carga axial y P_{in} - esfuerzo producido internamente en el tubo por el mandril.

Los defectos que están relacionados con las cargas de trabajo son:

Cuando el esfuerzo σ_{xf} es excesivo: 1) Excesiva delgadez en la pared externa de la curva [13, 43, 44, 69]; 2) Colapso del tubo en forma de rotura a consecuencia de haber sobrepasado el límite de rotura [13]; 3) Formación de grietas transversales, a consecuencia de la excedencia del esfuerzo último del material del tubo,[13]; 4) Diferencias de dimensiones entre las curvas en tubos en una misma producción [14]; 5) Dificultad en el cálculo de la dimensión inicial del tubo; 6) imprecisión en la geometría del producto final [14]; 7) Dificultad para lograr las posiciones de doblado en dobladoras tanto manuales como automatizadas CNC [14]

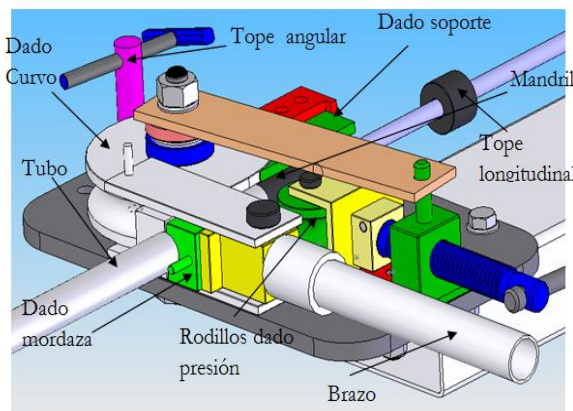
Cuando el esfuerzo σ_{xf} es insuficiente: 1) Fallas en forma de colapso y distorsión total de la forma de la curva [20]; 2) Distorsión de la forma circular de la sección transversal del tubo en la curva en forma de elipse [13, 43]; 3) formación de arrugas en la parte interna de la curva. [13, 43, 90, 95].

Cuando la presión interna P_i es excesiva: esta situación está relacionada con escasa holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo, lo cual puede hacer colapsar el doblado del tubo por rotura.[87].

Cuando la presión interna P_i es insuficiente: esta situación está relacionada con una holgura exagerada entre el mandril y el diámetro interno del tubo, y puede ocasionar: formación de arrugas en la pared interna de la curva.[43] .

1.5 Máquinas para doblado de tubos por arrastre

Existe una gran variedad de máquinas para operaciones de doblado de tubos por arrastre, para diámetros desde ½ pulgada (12,7 mm), hasta 10 pulgadas (254 mm) y más, operadas manualmente, eléctricas e hidráulicas., de accionamiento manual o programadas CNC, todas estas máquinas poseen varios conjuntos para doblados de diferentes dimensiones de diámetros de tubos y radios de doblados, que deben poder ser cambiados de manera muy versátil. A manera de ejemplo se ilustra en la figura 1.10 una máquina de doblado por arrastre manual y otra automática CNC de la empresa CML USA [96] .



Dobladora de tubos por arrastre manual.



Máquina CNC para doblado de tubos por arrastre

Fuente: [96]

Figura 1.10 Máquinas para doblado de tubos

Para doblados a cualquier ángulo entre 0-90 grados en tuberías con diámetros hasta 3 pulgadas (76,2 mm), produce operaciones de doblado en pocos segundos y se pueden

doblar tubos de acero, aluminio, aceros inoxidables, al cromo y otros. Se pueden hacer operaciones de doblado en tuberías de pared gruesa y delgada.

Existen otras empresas dedicadas a la fabricación de máquinas, herramientas y accesorios para la industria del doblado de tubos, que producen equipos manuales, semiautomáticos, o programados por CNC, con capacidades para el doblado de tubos hasta 150 mm de diámetro y algunas hasta 250 mm, y con espesores de pared hasta 6 mm; [86, 96-106].

1.6 Software utilizados en procesos de doblado de tubos

En los últimos tiempos se ha desarrollado una serie de innovaciones que han permitido la creación de nuevas tecnologías para facilitar el proceso de diseño y fabricación de productos tubulares metálicos, lo cual mejora la calidad, productividad y precisión de los procesos y producto final. Existe una gran variedad de software automatizados destinados a la fabricación y diferentes estudios de tuberías dobladas. LS-DYNA [107] es un avanzado paquete de software para fines generales multifísicos, es un código no lineal para resolver problemas transitorios que permitan soluciones de múltiples etapas; el código es utilizado para resolver el modelo analítico de predicción en varios trabajos [35, 43, 83, 108, 109]. KBS [110] es un programa computarizado basado en los métodos y técnicas de la inteligencia artificial, utilizado en el trabajo de Jin [42], para facilitar el diseño de procesos de doblado de tubos. En el trabajo de Strano [13] es utilizada una metodología computarizada denominada Tube ProDes para facilitar el proceso de diseño de tuberías dobladas, luego el herramental es seleccionado por lógica difusa. ABAQUS es un software para análisis por elemento finito. SIMULIA [111], utilizado para el modelo numérico de Orban [69], en su trabajo de detención de arrugas en tubos doblados y Lepadatu [50] en su

trabajo de optimización de la recuperación elástica en procesos de doblado; también es utilizado en el trabajo de Ceclan [78] para el modelado del doblado de tubos por pistón; Zhao [87] utiliza este software para el análisis FEM de la distorsión de la sección transversal en el doblado por arrastre en tubos rectangulares de pared delgada. HEEDS [112], es un paquete de software que interactúa con las herramientas comerciales de CAE, a fin de automatizar y mejorar la búsqueda de mejores productos y / o diseño de los procesos, puede realizar programas de optimización tanto objetivo como multi-objetivo (de Pareto). Además, atiende a la capacidad de realizar diseño de experimentos y análisis de confiabilidad. Este software es utilizado en el trabajo de Abedrabbo [108] de optimización de procesos de hidroformado de tubos.

RSM [113] (Response Surface Methodology) es una metodología basada en aproximación difusa (DA). Este método explora las relaciones entre varias variables explicativas y una o más variables respuesta. La idea principal de RSM es utilizar una secuencia de experimentos diseñados para obtener una respuesta óptima. Este método es utilizado por Naceur [48] para el desarrollo de su trabajo de optimización de geometría de herramientas y en el trabajo de Lapadatu [50] en su trabajo Optimización de la recuperación elástica en los procesos de doblado usando FEM. El método de Monte Carlo [114] es un método no determinístico o estadístico numérico usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. Este software es utilizado en el trabajo de Lou [14]. El método de Taguchi [115] es un método estadístico utilizado para mejorar la calidad de los productos manufacturados y, más recientemente, también se aplica a la ingeniería. Este método es utilizado en el trabajo de Li [116] para el diseño de un arreglo ortogonal en su trabajo de optimización de los parámetros de hidroformado. Redes

Neuronales Artificiales [117]: Las redes de neuronas artificiales RNA o "ANN" son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Este método alternativo es propuesto por Lazarescu [94] para determinar algunos problemas de doblado de tubos tales como la distorsión de la sección transversal del tubo (forma oval), ángulo de doblado, (recuperación elástica) y variación del espesor de las paredes del tubo. Bend Tech EZ Bend Tube Bending Software [118] es un software de diseño de tuberías que utiliza plantillas como datos de entrada. Diseña para reducir al mínimo el desperdicio en la manufactura y en las operaciones de fabricación, elimina los errores asociados a cálculos manuales. Forasassi [119] utiliza el software MSC.MARC FEM code [120] para el análisis del comportamiento de los tubos en la inestabilidad al pandeo. PAN TUBE 2G [121] es un paquete de software intuitivo, donde se guía al usuario a través de los diferentes pasos del proceso. PAM-TUBE 2G ofrece precisión en la simulación de tubos doblados con modelos realistas y el comportamiento de la herramienta. Este software es utilizado en el estudio de Mentella [92]. En su estudio del comportamiento del material de los tubos sometidos a procesos de doblado.

1.7 Aplicación de las técnicas modernas del Análisis y Síntesis de Sistemas de Ingeniería a la preparación para la fabricación por conformación plástica

Las exigencias prácticas actuales han originado métodos científicos especiales, aplicables a diferentes ramas de la ciencia y la técnica, desarrollados para facilitar la toma de decisiones para la preparación de los procesos de fabricación por conformación de metales. Estos métodos, de forma general, se basan en los fundamentos de la Teoría de Sistemas aplicada a las particularidades de la Ingeniería e interrelacionan técnicas de simulación,

representación gráfica y optimización en un proceso integrado de preparación y toma de decisiones, respetando el conjunto de restricciones propias de este tipo de tareas [122]. Shamasundar [123] recomienda el método por elemento finito (FEM) para simular procesos de conformado tales como, hidroformado y doblado con la finalidad de maximizar la deformación para la obtención de perfiles complejos, minimizar costos de experimentación y reducir desechos resultantes de la experimentación física. Lou [15] utiliza un control a partir de datos de lotes de tubos doblados para la obtención de una mejor precisión en la determinación de la recuperación elástica. Este proceso de control es desarrollado para reducir el error total en la fabricación del tubo a partir del conocimiento obtenido como resultado del control. Lou [14] utiliza el método estadístico para analizar e incrementar la precisión del doblado en 3D. La relación entre el error del proceso de doblado y el error de la geometría del tubo se obtiene por simulación con ayuda del método de Monte Carlo. Se determina que entre los siguientes errores en la configuración del doblado:

- a) diferencia del ángulo de doblado con respecto al establecido
- b) diferencia del plano de doblado con respecto a la establecida
- c) diferencia de distancia entre dobleces que se obtiene como consecuencia de la no constancia de la carga axial.

El primero es el que tiene la mayor influencia en el error total del tubo. Para un tubo con múltiples dobleces el error total de geometría del tubo se puede minimizar modificando intencionalmente los valores nominales del doblado basándose en los errores de doblado existentes. La modificación requerida en los comandos de doblado se calcula mediante un algoritmo adaptado de corrección. Yang [24] propone un modelo de función de ondas de

arrugas para predecir el mínimo radio de doblado basado en las teorías de cáscara delgada, deformación plástica y el principio de la energía y función de ondas. Puede servir como herramienta útil en la práctica para procesos de diseño y optimización de procesos. Los resultados del método energético obtenido en el trabajo de Wang [72] pueden servir como herramienta y parámetros de diseño y optimización en los procesos de doblado de tubos para determinar el mínimo radio de doblado para el cual no habrá arrugas en función de la geometría de las herramientas y las propiedades mecánicas del material de trabajo. Kuboki [124] utiliza el método por elementos finitos dimensional para simulación del proceso de distribución del espesor de pared de tubos de simetría axial. Utilizando el método propuesto, la distribución de espesor de pared es preparada para mejorar la rigidez a la flexión, manteniendo la condición de volumen constante. Kirby [109] desarrolla una herramienta interactiva para interrelacionar métodos de optimización no lineal con el análisis de elementos finitos en procesos de hidroformado y doblado de tubos en un procedimiento único. La disposición del proceso es integrada a través de un software único de interface que provee completa flexibilidad en la selección de las variables de diseño en la función objetivo. H Naceur [48] trata la optimización de la geometría de las herramientas en el formado de hojas de metal para reducir el efecto de la recuperación elástica después del formado. En el trabajo de Li [116] se emplea un proceso simulación para la preparación de hidroformado de tubos para encontrar parámetros de adecuados de conformado procurando maximizar el abultado y minimizar el adelgazamiento del radio. El método de Taguchi es aplicado para designar el arreglo experimental y los experimentos virtuales son analizados por elemento finitos. En Abedrabbo [108] se vincula un procedimiento de optimización con el método de elementos finitos LS-DYNA para buscar los parámetros de

procesos de hidroformado de tubos de acero de alta resistencia. El objetivo de esta investigación consiste en maximizar la formabilidad e identificar la presión hidráulica interior y la velocidad final de alimentación adecuadas. Lepadatu [49, 50] plantea la optimización de la recuperación elástica de un proceso de doblado, utiliza el concepto de diseño experimental y el método de superficie de respuesta (RSM). El método de optimización incluye dos fases. La primera involucra la predicción utilizando el diseño de los experimentos y RSM, mientras la segunda es la optimización del proceso que utiliza el método del gradiente. Strano [125] propone un método novedoso de análisis por elementos finitos para la determinación de valores apropiados de las variables de diseño de procesos de deformación plástica de metales. Este método es útil cuando uno o más parámetros de procesos no controlables pueden ser modelados como variables al azar que son introducidas con grados de incertidumbre dentro de procesos de solución. El problema es formulado como una minimización de función de costo. Nock [81] propone resolver por el método de elementos finitos un problema de preparación de la tecnología de doblados de tubos, utilizando rodillos elastómeros, relacionando el efecto de la ovalación y la generación de la curvatura de tubos de diferentes materiales. Los parámetros de simulación estudiados son mostrados para describir la influencia de la escala de masa y el comportamiento de la fricción. Xia [126] presenta un procedimiento para obtener un diseño óptimo para tuberías tipo sándwich compuesto. Para simplificar los parámetros de diseño se establecen las variables a dimensionales como parámetros de optimización de las estructuras de tuberías tipo sándwich. La influencia del diseño de los parámetros en la rigidez de la flexión y las fuerzas del doblado es discutida en referencia para cada parámetro de diseño a dimensional. Seleccionando los parámetros y geometría adecuada cuidadosamente se puede minimizar el

costo y peso de las tuberías compuestas. Di-Lorenzo[127] propone la integración de diferentes herramientas de técnicas de inteligencia artificial, simulaciones numéricas y experiencia experimental para realizar diseños de procesos de hidro conformado. En Arzola [122] se propone una metodología de análisis y síntesis de sistemas que integra los métodos propios de Teoría de Sistemas, del análisis multicriterial, optimización exacta, aproximada y heurística, de organización racional de los cálculos de ingeniería, de simulación y representación gráficas en procesos de preparación y toma de decisiones, los que se aplican a numerosas tareas de diferentes áreas de la ingeniería. En particular, se presentan aplicaciones a tareas propias del conformado de metales.

Esta integración de procedimientos de diferentes áreas de la Ciencia asociados a los procesos de toma de decisiones resultan adecuados para enfrentar la preparación de los procesos de fabricación para el doblado de tubos por arrastre.

1.8 Diferentes métodos de solución de los problemas de optimización multicriterial

Generalmente no existe una solución que optimice de forma simultánea todas las funciones objetivo, por lo que se requiere de la implementación de alguno de los métodos de solución existentes, que son los métodos matemáticos y los heurísticos.

1.8.1 Optimización matemática

Se entiende como Optimización Matemática la aplicación de métodos matemáticos cuantitativos utilizados para argumentar las decisiones orientadas a una finalidad u objetivo en cualquier esfera de la actividad humana, respetando el conjunto de restricciones que por diversas razones siempre es necesario imponer a los problemas [128-130]. Uno de los métodos más difundidos en la optimización matemática es el **método de los pesos**, para

llegar al mejor compromiso entre indicadores formalizables de eficiencia es necesario explorar el conjunto de las alternativas eficientes [122, 129-140]. El enfoque más común consiste en tratar de construir una aproximación a la función de valor U y se le asigna un peso $w_i > 0$ a cada objetivo como expresión de su importancia relativa y se considera la función:

$$Z = w_1 y_1 + w_2 y_2 \dots \dots \dots w_k y_n \quad (1.7)$$

Si Z se acerca a U entonces el punto mínimo de Z se acerca al mejor compromiso y cambiando los valores de los pesos w_i se generan otras soluciones eficientes con otros compromisos.

Otra aproximación a la función del valor de U se obtiene mediante sencillas operaciones algebraicas:

$$Z = \sum_{i=1}^m w_i \frac{y_i - y_i^{id}}{y_i^{est}} \quad (1.8)$$

Donde:

w_i es el coeficiente que refleja la importancia concedida por el usuario al indicador de eficiencia y_i .

y_i^{id} valor ideal de criterio de eficiencia y_i , el cual se obtiene como resultado de optimizar individualmente este criterio sin consideración de los demás restantes.

y_i^{est} es la estimación del valor de y_i^{id} , (diferente de cero).

Estas funciones de utilidad intentan expresar la intención de minimizar las distancias ponderadas de los valores obtenidos por cada uno de los criterios en la solución de compromiso.

En los problemas de optimización, el método de los **multiplicadores de LaGrange**, llamados así en honor a Joseph Louis LaGrange, [141] es un procedimiento para encontrar los máximos y mínimos de funciones de varias variables sujetas a restricciones. Este método reduce el problema restringido con n variables a uno sin restricciones de $n + k$ variables, donde k es igual al número de restricciones, y cuyas ecuaciones pueden ser resueltas más fácilmente.

La **Programación Lineal** [142] es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal. Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que expresamos mediante un sistema de inecuaciones lineales.

Programación no lineal (PNL) [141, 143-149] es el proceso de resolución de un sistema de igualdades y desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas, con un función objetivo a maximizar (o minimizar), cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no son lineales.

La **programación dinámica** es un procedimiento especial, para la búsqueda de decisiones en múltiples etapas en los procesos; ellas resuelven un tipo de problema particular de estructuras, de una forma más viable que las matemáticas, este método reduce la cantidad de cálculos que deben ser realizados y el éxito depende de la correcta formulación del problema. [128, 143].

Métodos **Branch & Bound**, [148, 150] conocidos en español como métodos de **Ramificación y poda** se suele interpretar como un árbol de soluciones, donde cada rama

nos lleva a una posible solución posterior a la actual. La característica de esta técnica con respecto a otras anteriores es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación de las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para “podar” esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima.

Procedimientos de permutación. [151] Este método tiene que ver con problemas que se representan como permutaciones y pueden encontrar un óptimo local de esos problemas, pero la elección y definición del óptimo local se decide para cada aplicación particular. Esto pudiera ser una libertad de uso, pero también conduce a incertidumbres acerca de la calidad de las respuestas obtenidas.

1.8.2 Optimización heurística

El rápido progreso en la aplicación de técnicas de optimización para procesos industriales ha sido impulsado principalmente por el aumento de nivel mundial de la competitividad y las regulaciones ambientales que fuerzan a las empresas para hacer un uso óptimo de sus recursos. Tales exigencias han derivado en la creación, desarrollo e implementación de los denominados algoritmos heurísticos, los cuales constituyen la base para la inteligencia artificial, se denominan heurísticos porque tienen la capacidad de tomar decisiones por sí mismos [152]. Algunos de estos algoritmos son:

Recocido Simulado [152-159] Esta técnica se inspira en el proceso de recocido al que muchas sustancias se someten al cambiar de estado. Por lo general, una sustancia, como el acero, por ejemplo, cuando gana energía por calentamiento. Esta energía es disipada gradualmente cuando se enfría el material, la temperatura es por lo tanto una medida del desorden en el acero a medida que se enfrían sus moléculas, ellas pierden energía calorífica y ganan orden, este proceso continúa hasta que el sistema puede alcanzar el equilibrio

termodinámico, eso ocurre cuando la temperatura del acero es la misma que la temperatura del ambiente.

Este algoritmo trata de imitar este proceso y por lo tanto, toma su nombre. Una de las dificultades en el uso de recocido simulado es que se hace muy difícil elegir las tasas de enfriamiento y las temperaturas iniciales para el sistema que se está optimizando. Esto ocurre principalmente debido a la ausencia de reglas para la selección de ellos. La selección de estos parámetros depende de la heurística y varía con el sistema que se está optimizando. Belegundu y Constans [160] utilizan recocido simulado para reducir la contaminación acústica. Usan un software llamado SOAR (Shell Optimización de la radiación acústica) para predecir la vibración y la potencia de sonido. Cederberg y Collins [161] en el Laboratorio de Investigación Naval, han utilizado recocido simulado para optimizar la solución de problemas inversos geoacústicas.

Boudet [159] utiliza recocido simulado para el diseño de filtros delgados de película.

Redes Neuronales [12, 89, 117, 162-168] son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida. En inteligencia artificial es frecuente referirse a ellas como redes de neuronas o redes neuronales. Lu Y. [165] ha desarrollado y aplicado las redes neuronales en la industria para controlar el peso del revestimiento aplicado en una capa de inmersión en caliente en una línea de una fábrica de acero, ellos reportaron un ahorro significativo en términos de reducción de peso del recubrimiento de 5% de Zinc. Lăzărescu [89] presenta un nuevo método para la predicción de algunos parámetros de calidad de tubos doblados: variación del radio, ángulo de recuperación elástica y espesor de

la pared del tubo. Este método utiliza Redes Neuronales Artificiales (RNA) considerando el diámetro del tubo, el espesor de la pared inicial y radio de curvatura. T. Belhadj [163] introduce un modelo basado en un los resultados experimentales. Este método permite una mejor distribución del espesor de la pared durante el proceso de extrusión de hidro conformado de tubos y la optimización de la geometría de la pieza final. Veluswami [169] en la Corporación Mitte en Canadá, junto con el Departamento de Electrónica de la Universidad de Carleton utiliza redes neuronales para optimizar interconexiones de alta velocidad de circuitos VLSI con modelos de simulación electromagnética. Yalcinoz [168] utiliza redes neuronales para la resolución y envío de problemas en la transmisión de sistemas. Los resultados que obtiene fueron muy similares a los obtenidos mediante la ecuación cuadrática por el método cuadrático de programación. Ko y Cho [164] utilizan redes neuronales para optimizar las operaciones de fresado frontal. Utilizaron dos redes neuronales, una para la estimación del desgaste longitudinal de la herramienta y la otra para la entrada de la cartografía y las relaciones de producción a partir de los datos durante el corte.

Colonia de Hormiga [170-175] El algoritmo colonia de hormiga es una técnica probabilística utilizada para solucionar problemas de cómputo; este algoritmo está inspirado en el comportamiento que presentan las hormigas para encontrar las trayectorias desde la colonia hasta el alimento. Gardel [173] presenta un trabajo de optimización de Colonia de Hormigas (ACO), algoritmo aplicado al problema de compensación de energía reactiva en un contexto multiobjetivo. El algoritmo desarrollado se denominada Omicron Electric (EO).

Algoritmos evolutivos [176-178] grupo de algoritmos heurísticos que son utilizados en soluciones de problemas de optimización multiobjetivo. En los problemas de optimización multiobjetivo se plantea la búsqueda de soluciones óptimas, (variables de decisión) dentro de un campo existencia de soluciones aceptables (frente de Pareto) por medio de diferentes técnicas. Algunos de estos algoritmos son:

Algoritmos genéticos [152, 179-184] desarrollados por J Holland en 1975. Son algoritmos capaces de aprender y tomar decisiones de manera autónoma, se comportan de manera similar a los principios de las leyes de la genética en la naturaleza. GA son ejecutados iterativamente sobre un conjunto de cromosomas codificados llamados población con tres operadores genéticos básicos: selección, cruce y mutación.

Duponcheele [181] utiliza algoritmo genético para la optimización de la forma de un parachoques estructural de automóvil. Deb [180] utiliza una variante del algoritmo genético denominado algoritmo genético desordenado en colaboración con ECIA, un fabricante de componentes del automóvil, para incrementar el momento de inercia de la sección transversal de una viga con respecto a la flexión y así aumentar la absorción de la energía cinética. La optimización consiste en aumentar la sección transversal mediante el aumento de la masa de la viga.

La **búsqueda tabú** [185] es un método de optimización matemática, perteneciente a la clase de técnicas de búsqueda local. La búsqueda tabú aumenta el rendimiento del método de búsqueda local mediante el uso de estructuras de memoria: una vez que una potencial solución es determinada, se la marca como "tabú" de modo que el algoritmo no vuelva a visitar esa posible solución. Lee [149] conjuntamente con el Instituto Graduado Nacional de Investigación y Administración y la Universidad John Hopkins, aplicación búsqueda

tabú y otros algoritmos para optimizar el seguimiento del diseño de redes al sistema de energía de Taiwán. El principal objetivo en el diseño de monitoreo de red es aprovechar al máximo la adquisición de información minimizando así los costos.

Aproximación Estocástica [186, 187] Mientras que algunas técnicas no clásicas de optimización son capaces de optimizar las funciones objetivo discontinuas, son incapaces de hacerlo cuando la complejidad de los datos se hace muy grande. Se utiliza en el caso en que la complejidad del sistema requiere que la función objetivo sea estimada. Además, los modelos que se utilizan para calcular la función objetivo pueden ser estocásticos, debido a la naturaleza dinámica y aleatoria del sistema y los procesos. Simha [187] con la fundación DARPA y la Oficina Naval de Investigaciones, utiliza Aproximación estocástica para minimizar el tiempo de establecimiento de llamadas, al equilibrar las cargas en los procesadores de llamadas.

Conclusiones del capítulo I

1. Las máquinas dobladoras de tubos han tenido un desarrollo vertiginoso en los últimos años, sin embargo, tanto en las operadas manualmente como en las automáticas, se producen defectos asociados a las cargas y la geometría de estos.
2. Aunque se han dedicado muchas investigaciones al estudio de los defectos que ocurren en los procesos de doblado, los resultados que aparecen en la literatura especializada no satisfacen los requerimientos de la preparación para la fabricación que permitan minimizar la influencia de las cargas, la geometría del doblado y el material del tubo en el surgimiento de defectos y fallas.

3. No existen en la literatura especializada ningún trabajo que trate el proceso de optimización multicriterial para el doblado de tubos por el método de arrastre que tenga en cuenta la variación de la carga axial y la presión interna durante el proceso.
4. En el desarrollo de procedimientos de preparación para la fabricación por doblado de tubos se requiere de la aplicación de metodologías de preparación y toma de decisiones que integren métodos de la Teoría de Sistemas, la simulación de procesos por procedimientos de alta complejidad, optimización y representación gráfica. En calidad de tal procedimiento se aplica, en lo adelante, la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas que aparece en Ruiz [122].

CAPÍTULO II

2 MODELO MATEMÁTICO CONCEPTUAL:

2.1 Introducción:

Como se explicó en el capítulo I de este trabajo, existen varios autores que han analizado el proceso de doblado de tubos por arrastre. Entre los autores que más han aportado a esta temática se encuentran Wang [43], Strano [13], Yang [24], Wang [61] y Agarwal [44]. Para poder desarrollar el modelo matemático que se expone en este capítulo, se partió de analizar los modelos de Wang y Agarwal, evaluando las insuficiencias y deficiencias de los mismos. De este análisis surgieron las expresiones desarrolladas por el autor de esta tesis para evaluar el aplanamiento, el afinamiento y la formación de arrugas. Precisamente uno de los aspectos más novedosos que se abordará en este capítulo es una expresión inédita para evaluar el defecto del arrugado.

2.2 Modelo matemático propuesto

Se presenta un modelo de análisis para predecir la distribución de espesor de la pared y la distorsión de la forma de la sección transversal del tubo cuando es sometido a doblado. Un modelo generalizado es desarrollado para predecir el cambio de espesor de la pared y la

distorsión de la sección transversal del tubo sometido a una presión interna que simula el trabajo del mandril combinada con una carga axial y un momento flector [44]

El sistema de coordenadas utilizado en el análisis se muestra en la figura 2.1 En un plano de flexión, un tubo de radio medio r y espesor de pared t se dobla sobre un dado curvo de radio R con un ángulo de flexión θ , La fuerza axial aplicada al tubo se simboliza como F , y la presión interna P_i Para el análisis en la sección transversal, en la circunferencia del tubo se selecciona un segmento elemental $d\alpha$ a cierto ángulo α . El extradós está definido por $0 < \alpha \leq \pi/2$, y $3\pi/2 \leq \alpha < 2\pi$. El intradós es $\pi/2 \leq \alpha < 3\pi/2$.

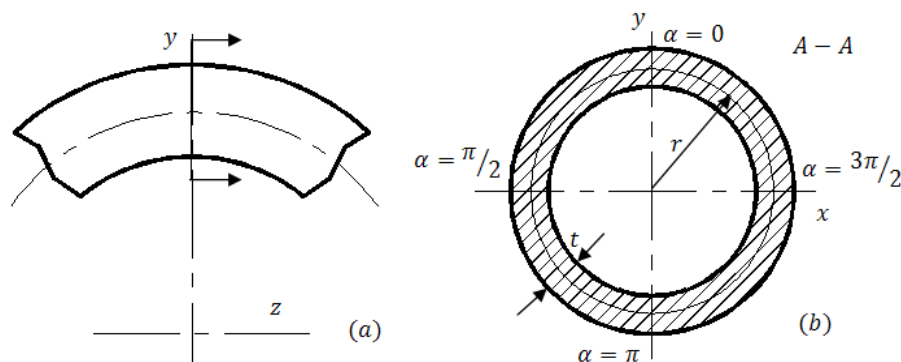


Fig. 2.1 Sistema de coordenadas del análisis de flexión (a) plano de flexión, (b) sección transversal del tubo [44]

La hipótesis para el análisis considera:

1. El plano perpendicular al eje del tubo antes de la deformación se mantiene plano y perpendicular al eje después de la deformación.
2. Espesor de la pared del tubo es pequeño en comparación con la longitud y el radio del tubo. Por lo tanto, la deformación de corte transversal es despreciada.
3. La deformación es simétrica con respecto al plano xy , el plano normal al plano xy en el ángulo $\theta/2$.

4. El material es incompresible, la deformación elástica se desprecia, y el coeficiente y exponente de endurecimiento por deformación no se considera.

5. La fricción entre el tubo y herramientas se desprecia.

6. La variación del eje neutro durante la flexión pura (doblado sin cargas adicionales) se desprecia.

Bajo estas suposiciones, se derivan las tensiones, deformaciones y espesores de pared, y la distorsión de la sección transversal del tubo debido a la flexión, la fuerza axial y la presión interna.

2.3 Esfuerzos axiales, circunferenciales y radiales:

En el caso de doblado por arrastre el tubo está sometido a tensiones longitudinales circunferenciales y radiales debidas al momento de flexión, la tracción axial y la presión interna.

2.3.1 Tensiones originadas por el momento flector y la carga axial

Consideremos un pequeño elemento del tubo deformado tal como se muestra en las figuras 2.2 a y 2.2 b.

La fuerza axial interna inducida en el elemento como consecuencia del momento de flexión es:

$$dP_{xm} = \sigma_{xm} dA = \sigma_{xm} t r d\alpha \quad (N) \quad (2.1)$$

Donde σ_{xm} es el esfuerzo axial inducido en el tubo debido a momento flector y dA es el área de sección transversal elemental. La fuerza axial inducida en el elemento, debido a la fuerza aplicada F axial es: dP_{xf}

$$dP_{xf} = \frac{F}{2\pi r t} tr(d\alpha) = \sigma_{xf} tr d\alpha \quad (N) \quad (2.2)$$

Donde $\sigma_{xf} = \frac{F}{2\pi r t}$ es el esfuerzo axial elemental debido a la fuerza axial aplicada.

De ahí que la fuerza axial y esfuerzo resultante son dados por:

$$dP_x = dP_{xm} + dP_{xf} = (\sigma_{xm} + \sigma_{xf}) tr(d\alpha) = \sigma_x tr(d\alpha) \quad (N) \quad (2.3)$$

Y la fuerza elemental centrípeta:

$$dv = 2dP_x \sin \frac{\theta}{2} \approx dP_x \theta \quad (N) \quad (2.4)$$

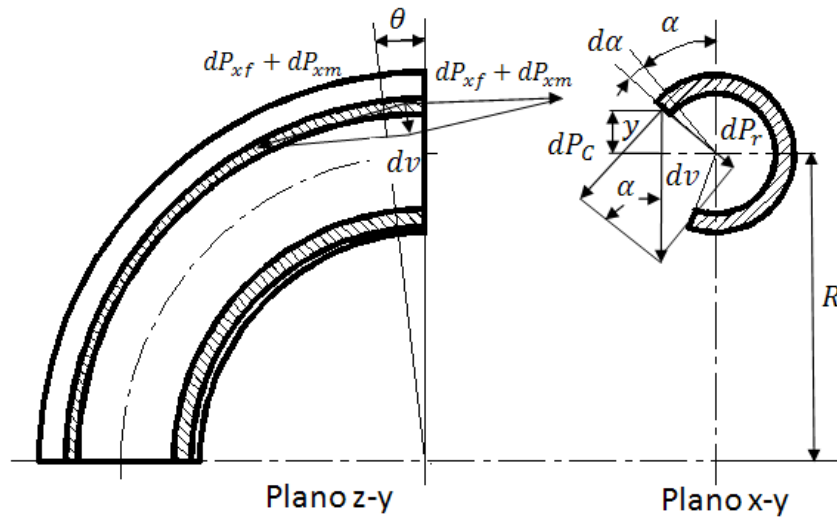


Fig. 2.2. a Diagrama de cargas en el elemental segmento deformado [44]

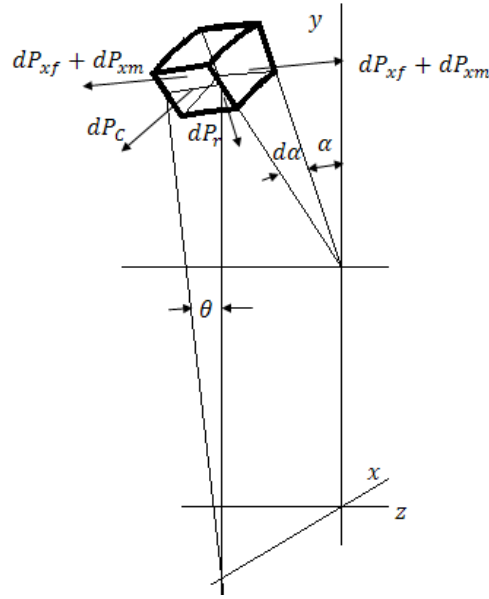


Fig. 2.2. b Cargas en el elemental segmento [44]

Y esta fuerza centrípeta, tiene un componente en la dirección circunferencial:

$$dP_c = d\sigma_c t r = \sigma_x t r (d\alpha) \theta \sin \alpha \quad (N) \quad (2.5)$$

Y la fuerza circunferencial, se puede representar a través del esfuerzo circunferencial [22]

$$dP_c = (d\sigma_c) t (R + y) \theta \quad (N) \quad (2.6)$$

Donde y es la distancia vertical desde el centro del tubo al elemento y $y = r \cos \alpha$, como se muestra en la figura 2.2. Igualando (2.2) y (2.6) se obtiene:

$$d\sigma_c = \frac{r \sin \alpha (d\alpha)}{R + r \cos \alpha} \sigma_x \quad (N) \quad (2.7)$$

Entonces integrando la ecuación 2.7 se obtiene el esfuerzo circunferencial:

$$\sigma_c = -\sigma_x \ln \frac{R + r \cos \alpha}{R + r} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.8)$$

Y para simplificar la expresión 2.6 se sustituye:

$$K = \ln \frac{R + r}{R + r \cos \alpha} \quad (-) \quad (2.9)$$

Se obtiene entonces:

$$\sigma_c = K \sigma_x \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.10)$$

Considerando solo el momento de flexión los resultados en la deformación plástica en base al criterio de Von Mises se pueden escribir:

$$(\sigma_x - \sigma_c)^2 + (\sigma_c - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_x)^2 = 2Y^2 \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.11)$$

En donde $\sigma_x = \sigma_{xm}$; $\sigma_c = K \sigma_x$; $\sigma_r = 0$, y:

El esfuerzo radial se puede considerar despreciable, ya que con la ecuación 2.4 y la figura 2.2 a y 2.2.b, se puede deducir fácilmente que:

$$\sigma_r = \frac{t * \cos \alpha}{R + r \cos \alpha} \sigma_x \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.12)$$

Y para cualquier ángulo α el esfuerzo radial es insignificante, ya que el espesor de pared t siempre será muy pequeño respecto al radio del dado curvo R , entonces se tiene:

$$\sigma_{xm} = \pm \frac{Y}{\sqrt{K^2 - K + 1}} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.13)$$

En donde Y es el límite de fluencia del material y el signo \pm indica la tracción o compresión en la parte externa e interna respectivamente, de la curva del doblado.

2.3.2 Tensiones originadas debido a la presión interna

La figura 2.3 muestra la presión interna que actúa sobre el tubo y la figura 2.4 muestra las tensiones inducidas en el tubo debido a ésta presión, que son los esfuerzos longitudinales σ_{xp} y circunferenciales σ_{cp} .

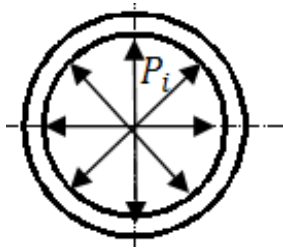


Figura 2.3 Presión interna en el tubo [44]

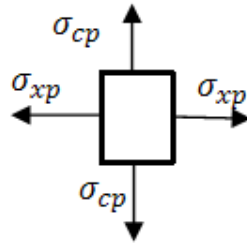
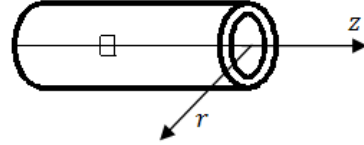


Figura 2.4 Esfuerzos producidos por la presión interna en el tubo [44]



En donde por definición se sabe que:

$$\sigma_{xp} = \frac{P_i r}{2t} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.14)$$

Y:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_i r}{t} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.15)$$

2.3.3 Estado resultante de esfuerzos:

Como resultado la tensión longitudinal en la parte externa de la curva debido a las cargas combinadas de flexión, la fuerza axial y la presión interna se puede expresar mediante la adición de la ecuación (2.14) a la ecuación (2.3) y sustituyendo la ecuación (2.13) y

$$\sigma_{xf} = \frac{F}{2\pi r t} \text{ en la ecuación (2.3)}$$

$$\sigma_x = \frac{Y}{\sqrt{K^2 - K + 1}} + \frac{F}{2\pi r t} + \frac{P_i r}{2t} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.16)$$

Y el esfuerzo circunferencial obtenido en la ecuación (2.15) se adiciona a la ecuación (2.10)

$$\sigma_c = K\sigma_{xe} + \frac{P_i r}{t} \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.17)$$

El esfuerzo radial en la curva es:

$$\sigma_r = 0 \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (2.18)$$

2.3.4 Desplazamiento del eje Neutro

En la figura 2.5 muestra la distribución de los esfuerzos axiales a través de la sección transversal del tubo en el caso de flexión pura. Se supone que al tubo se aplica primero el momento de flexión y luego es aplicada carga axial [82] Debido a la aplicación de la carga axial el eje neutro se desplaza hacia la parte interna de la curva a cierta distancia e , tal como se ilustra en la figura 2.6.

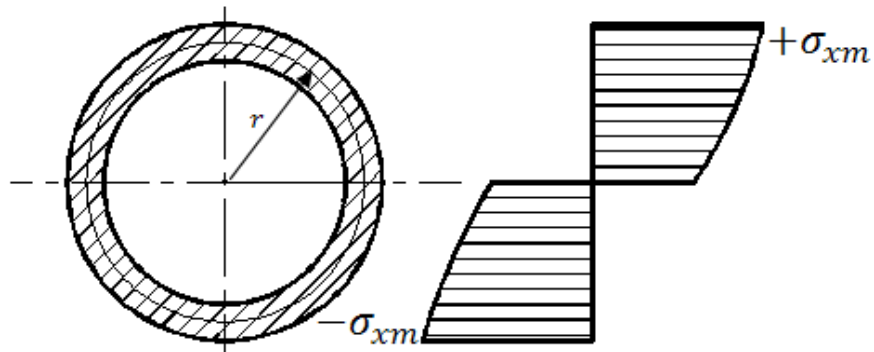


Figura 2.5 Esfuerzos axiales caso de aplicación solo de momento flector M [44]

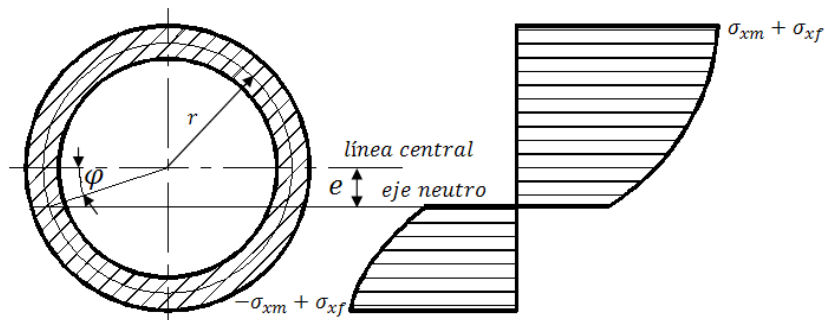


Figura 2.6 Desplazamiento del eje neutro debido a la aplicación de la carga axial [44]

La deformación longitudinal tiene dos componentes: la deformación producida por la carga axial ϵ_{xf} y la deformación producida por el momento flector ϵ_{xm} . El esfuerzo de tracción se mantiene constante en toda la sección.

$$\epsilon_x = \epsilon_{xf} + \epsilon_{xm} = \frac{e}{R} + \frac{y}{R} \quad (-) \quad (2.19)$$

Duncan [188] calcula el desplazamiento del eje neutro en el tubo doblado, análogamente al caso de una lámina sometida a flexión y tracción mediante la siguiente ecuación:

$$F = \int_0^{\varphi} Yt(rcos\alpha)d\alpha - \int_0^{\pi} Yt(rcos\alpha)d\alpha \quad (N) \quad (2.20)$$

Entonces:

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{F}{2Ytr}\right) \quad (^\circ) \quad (2.21)$$

Donde φ es el ángulo que determina la posición del eje neutro y:

$$y = rcos\alpha \quad (mm) \quad (2.22)$$

Y:

$$e = r \sin \varphi \quad (mm) \quad (2.23)$$

La deformación longitudinal resultante se obtiene sustituyendo las ecuaciones (2.22) y (2.23) en la (2.19)

$$\varepsilon_x = \frac{r}{R}(cos\alpha + \sin\varphi) \quad (-) \quad (2.24)$$

Y por la regla del flujo plástico, el estado de deformación se puede obtener:

La deformación radial:

$$\varepsilon_r = \frac{2\sigma_r - (\sigma_x + \sigma_c)}{2\sigma_x - (\sigma_c + \sigma_r)} \varepsilon_x \quad (-) \quad (2.25)$$

Y la deformación circunferencial:

$$\varepsilon_c = \frac{2\sigma_c - (\sigma_r + \sigma_x)}{2\sigma_x - (\sigma_c + \sigma_r)} \varepsilon_x \quad (-) \quad (2.26)$$

2.4 Cambio del espesor de la pared y distorsión de la sección transversal del tubo doblado

El cambio de espesor de la pared y la distorsión de la sección transversal se pueden derivar de las tensiones y deformaciones debidas a las cargas. El engrosamiento y adelgazamiento de las paredes de la curva se encuentran a partir de la deformación radial.

$$t_{\alpha} = (1 - \varepsilon_r)t \quad (mm) \quad (2.27)$$

Dónde t_{α} es el espesor de la pared del tubo en un determinado ángulo α .

La deformación radial en la parte externa de la curva se obtiene sustituyendo las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.24) en la ecuación (2.25) y se tiene entonces:

$$\varepsilon_r = \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K + 1) \frac{P_i r}{2t} + (K + 3) \left[\frac{r}{R} (\cos \alpha + \sin \varphi) \right]}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t} K} \quad (-) \quad (2.28)$$

Entonces se sustituye (2.28) en (2.27) y el espesor de la pared del tubo en la curva es:

$$t_{\alpha} = \left\{ 1 + \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K + 1) + \frac{P_i r}{2t} (K + 3) \left[\frac{r}{R} (\cos \alpha + \sin \varphi) \right]}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t} K} \right\} t \quad (mm) \quad (2.29)$$

La distorsión de la sección transversal es causada por la deformación circunferencial en el tubo y se puede obtener sustituyendo las ecuaciones (2.16), (2.17), (2.18) y (2.24) en (2.26), y la deformación circunferencial a lo largo de la curva puede ser calculada de la manera siguiente:

$$\varepsilon_c = - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K - 1) + \frac{P_i r}{2t} (2K + 3) \left[\frac{r}{R} (\cos \alpha + \sin \varphi) \right]}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t} K} \quad (-) \quad (2.30)$$

Entonces la variación del radio en la curva es:

$$r_{\alpha} = (1 + \varepsilon_c)r \quad (mm) \quad (2.31)$$

Sustituyendo la ecuación (2.30) en (2.31) el radio del tubo en la curva se calcula:

$$r_{\alpha} = \left\{ 1 - \frac{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(2K - 1) + \frac{P_i r}{2t}(2K + 3)}{(\sigma_{xm} + \sigma_{xf})(K - 2) + \frac{P_i r}{2t}K} \left[\frac{r}{R} (\cos \alpha + \sin \varphi) \right] \right\} r \quad (mm) \quad (2.32)$$

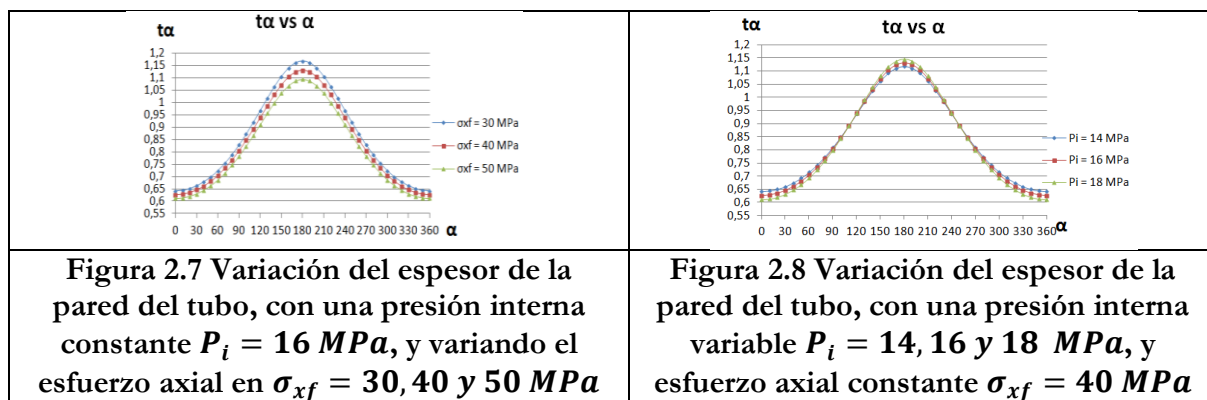
2.5 Determinación del rango de variación de los espesores de pared y los radios del tubo en la sección transversal de la curva

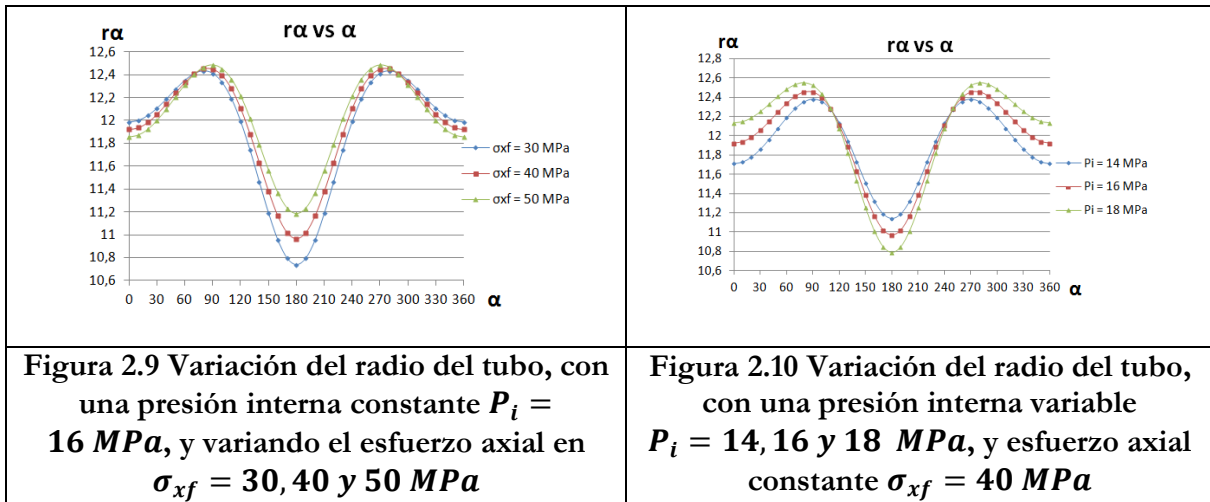
A manera de ejemplo, con la finalidad de ilustrar el rango de variación del espesor y el radio del tubo se implementa el software MATHEMATICAL, para correr las ecuaciones (2.2.29) y (2.32) con las variables de coordinación ilustradas en la tabla 2.1 (ver anexos I y II).

Tabla 2.1 Datos de las variables de coordinación para el software MATHEMATICAL

Material del tubo	Acero AISI 1020 laminado en frio
Límite de fluencia	$Y = 350 \text{ MPa}$
Diámetro externo del tubo	$D = 25,4 \text{ mm}$
Espesor de pared inicial	$t = 0,9 \text{ mm}$
Radio de doblado	$R = 50,8 \text{ mm}$

En las figuras 2.7 y 2.8 se puede ver la variación del espesor de pared del tubo en la curva, con variación de la presión interna y del esfuerzo axial, según ecuación 2.29.





2.6 Determinación del rango de variación de las variables independientes que intervienen en el modelo

Las variables sometidas a estudio en este trabajo son las variables de carga, ellas son: 1), el esfuerzo axial σ_{xf} producido por la carga axial F , y 2) la presión interna P_i , que representa el trabajo del mandril y 3) el esfuerzo axial σ_{xm} producido por el momento flector M , el cual depende del material del tubo y de las variables de coordinación r y R , por esa razón no se considera como variable.

2.6.1 Determinación de los intervalos de valores para la variable independiente σ_{xf}

Según Tang [22] la ecuación que establece la magnitud inicial de la curva en los tubos doblados por el método de compresión (también por arrastre) es la siguiente:

$$l_i = R * \gamma_0 - e(\gamma_0 - \beta) \quad (mm) \quad (2.33)$$

En donde:

l_i es la longitud inicial de la curva (segmento del tubo doblado)

γ_0 es el ángulo al que es necesario realizar la operación de doblado para obtener un ángulo de doblado γ . (Ver figura 2.11)

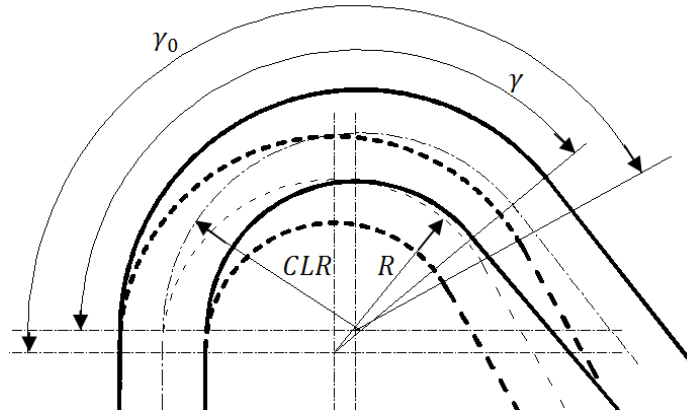


Figura 2.11 Ángulos y radios en la recuperación elástica [56]

El ángulo γ_0 se puede calcular mediante la siguiente ecuación según Strano [13]

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{R}{CLR} = 1 - \frac{M * R}{EI_0} \quad (^\circ) \quad (2.34)$$

CLR es el radio de la curva final después de la recuperación elástica.

M es el momento flector del doblado

Ya que para el modelo establecido (ecuación 2.13), cuando $\alpha = 0$, $K = 0$, y $\sigma_{xm} = Y$,

Entonces M por definición se puede calcular:

$$M = \frac{2I_0 Y}{D} \quad (N \times m) \quad (2.35)$$

I_0 es el momento de inercia de la sección del tubo.

$$I = \frac{\pi(D^4 - D_0^4)}{64} \quad (m^4) \quad (2.36)$$

D_0 es el diámetro interno del tubo.

E es el módulo elástico del material del tubo.

β es el ángulo de transición, $\beta = 5^\circ$ según Lou [14, 15]. Ver figura 2.12.

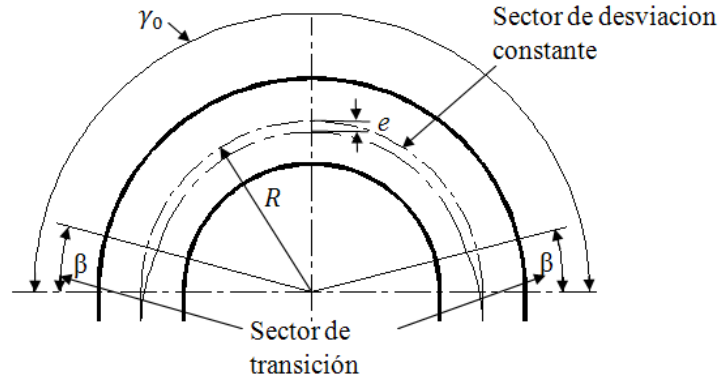


Figura 2.12 Sectores de desviación de la línea neutra. Fuente: Tang [22]

En la ecuación (2.33) es fácil observar que la expresión $e(\gamma_0 - \beta)$ es la elongación del segmento doblado a consecuencia de la deformación plástica, según la experiencia se ha determinado que en doblado de tubos de acero AISI 1020 laminado en frío, ese valor es aproximadamente $6,71 \text{ mm}$, para tubos con $D = 25,4 \text{ mm}$, espesor de pared $t = 0,9 \text{ mm}$, límite de fluencia $Y = 350 \text{ Mpa}$, radio de doblado $R = 70 \text{ mm}$ y para un ángulo de doblado $\gamma = \pi/2 \text{ rad}$.

Entonces según esos datos se puede calcular el ángulo φ de acuerdo al siguiente procedimiento:

Por la ecuación (2.34) se calcula el ángulo de doblado:

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{R}{CLR} = 1 - \frac{M * R}{EI_0}$$

$$\gamma_0 = \frac{\gamma}{1 - \frac{M * R}{EI}} = \frac{\frac{\pi}{2}}{1 - \frac{143,43 \text{ N} \times \text{m} \times 0,07 \text{ m}}{2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \times 5,2 \times 10^{-9} \text{ m}^4}} = 1,586 \quad (\text{rad})$$

Por la ecuación (2.35) el momento flector de doblado:

$$M = \frac{2IY}{D} = \frac{2 \times 0,52 \times 10^{-9} m^4 \times 350 \times 10^6 \frac{N}{m^2}}{0,0254 m} = 143,43 \quad (N \times m)$$

Por la ecuación (2.36) el momento de inercia:

$$I = \frac{\pi(D^4 - D_0^4)}{64} = \frac{\pi(0,0254^4 - 0,0236^4)}{64} = 5,2 \times 10^{-9} \quad (m^4)$$

Se sustituye el valor γ_0 en la ecuación de la elongación y se obtiene el valor de e :

$$e = \frac{6,71mm}{(\gamma_0 - \beta)} = \frac{6,71mm}{\left(1,586 - \frac{5}{180} \times \pi\right)} = 4,48 \quad (mm)$$

Es obvio suponer que el radio medio del tubo se puede calcular:

$$r = \frac{D - t}{2} \quad (mm) \quad (2.37)$$

Entonces:

$$r = \frac{2,54mm - 0,9mm}{2} = 12,25 \quad (mm)$$

Y por la ecuación 2.23 se calcula entonces el ángulo φ :

$$\sin \varphi = \frac{e}{r} = \frac{4,48}{12,25} = 0,3654 \rightarrow \varphi = 21,43^\circ$$

Entonces por la ecuación (2.21) se determina el valor promedio del esfuerzo axial:

$$\sin \varphi = \left(\frac{F}{2Ytr} \right) = \left(\frac{\sigma_{xf} \times 2\pi tr}{2Ytr} \right) = \frac{\sigma_{xf}\pi}{Y}$$

Y:

$$\sigma_{xf} = \frac{Y * \sin \varphi}{\pi} = \frac{350MPa \times 0,3665}{\pi} = 40,71 \quad (MPa)$$

La experiencia ha demostrado que para múltiples operaciones de doblado ese valor promedio puede oscilar entre $\sim \mp 20\%$, entonces de acuerdo a esto el intervalo de valores para el esfuerzo axial queda definido de la siguiente manera:

$$\sigma_{xf} = (30 \div 50) \quad (MPa) \quad (2.38)$$

Para el acero 1020 con un límite de fluencia $Y = 350 \text{ Mpa}$. No obstante, es de esperarse que para otros materiales esas magnitudes de la carga axial tengan una proporcionalidad análoga respecto a la magnitud de su correspondiente límite de fluencia, entonces de acuerdo a esto se puede establecer que para el doblado de tubos por arrastre de cualquier material dúctil, el intervalo de valores de la carga axial quedan definidos de la siguiente forma:

$$\sigma_{xf} = (30 \div 50) \frac{Y^1}{Y} \quad (MPa) \quad (2.39)$$

En donde:

Y^1 es el valor del límite de fluencia del otro material estudiado.

2.6.2 Determinación de los intervalos de valores para la variable independiente P_i

En el punto anterior se determinó que el valor promedio para el esfuerzo axial es $\sigma_{xf} = 40 \text{ Mpa}$, asimismo se realizó una medición de los diámetros máximos y mínimos en la curva, de varios tubos de acero AISI 1020 laminado en frío, doblados en forma experimental, con límite de fluencia $Y = 350 \text{ Mpa}$, de diámetro $25,4 \text{ mm}$, espesor de pared $t = 0,9 \text{ mm}$ y radio de doblado $R = 70 \text{ mm}$, y los valores promedio obtenidos se ven en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Mediciones hechas experimentalmente de los diámetros máximos y mínimos en tubos doblados de acero 1020

	Valores promedios [mm]	Radio del tubo [mm] $r = \frac{D - t}{2}$
$D_{max} = 2r_{\pi/2}$	25,80	$r_{\pi/2} = 12,45$
$D_{min} = r_0 + r_{\pi}$	23,33	$r_0 + r_{\pi} = 22,43$

En la figura 2.13 se puede ver los diámetros medidos, ellos son:

D_{max} es el máximo diámetro del tubo en la curva.

D_{min} es el mínimo diámetro del tubo en la curva.

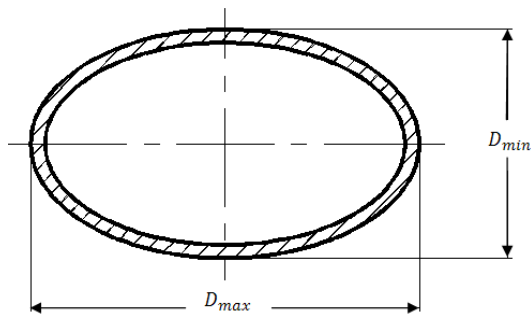


Figura 2.13 Diámetros medidos experimentalmente en la curva del tubo

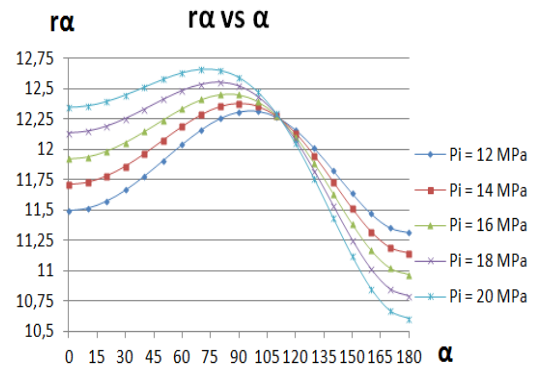


Figura 2.14 Variaciones del radio medio de un tubo (ver anexo III)

Se procede entonces a realizar una corrida en el software MATHEMATICAL de la ecuación (2.32), con las mismas condiciones del doblado experimental, manteniendo la carga axial constante $\sigma_{xf} = 40 \text{ MPa}$ y variando la presión interna, se puede ver los resultados en la figura 2.14.

Y los valores de las variaciones de los radios en la curva con la corrida en el Mathematical, con las especificaciones del doblado experimental, se pueden ver en la tabla 2.2.

Se puede ver que los valores de los radios que más se aproximan a los experimentales son los correspondientes a los doblados con presión interna $P_i = 16 \text{ MPa}$. Los diámetros para esa presión se aproximan en un 0,99995% para el máximo diámetro y 0,98% para el mínimo.

Tabla 2.3 Mediciones obtenidas con ayuda del software Mathematical, en el doblado de un tubo de acero 1020, con las condiciones de la figura 2.14

	$P_i - [\text{MPa}]$				
$r [\text{mm}]$	12	14	16	18	20
r_0	11,49646	11,70866	11,92087	12,13307	12,34528
$r_{\pi/2}$	12,30873	12,37877	12,44937	12,52054	12,59228
r_{π}	11,31267	11,14115	10,96591	10,78681	10,60374

La función de la presión interna es crear un esfuerzo circunferencial en la pared del tubo, con la finalidad de evitar el colapso del tubo hacia adentro, ese esfuerzo circunferencial se puede calcular por la ecuación (2.15), entonces para los experimentos realizados:

$$\sigma_{cp} = \frac{P_i r}{t} = \frac{16 \text{ Mpa} * 12.25 \text{ mm}}{0,9 \text{ mm}} = 217,78 \quad (\text{MPa})$$

Entonces de acuerdo al mismo razonamiento anterior el intervalo de valores para la presión interna para un tubo con las condiciones establecidas en la figura 2.14, queda establecido de la siguiente manera:

$$P_i = (0,87 \div 1,12) \left(217,78 * \frac{t}{r} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (2.40)$$

Es de esperarse que otros materiales dúctiles se comporten de manera análoga, por lo tanto en forma general, el intervalo de límites de la variable de decisión de la presión interna se puede definir de la siguiente manera:

$$P_i = (0,87 \div 1,12) \left(217,78 * \frac{t}{r} \right) \frac{Y^1}{Y} \quad (\text{MPa}) \quad (241)$$

2.7 Relación entre la magnitud de la presión interna P_i y la holgura entre el diámetro interno del tubo y el diámetro del mandril

Imaginemos a un tubo apoyado en cierto plano tal como se ilustra en la figura 2.15. a, luego en la figura 2.15.b, es sometido a cierta carga P , (la cual es ejercida por los dados de presión y soporte sobre el tubo, ver figura 1.8), que lo hace deformar elípticamente, en la figura 2.15.c se le aplica la misma carga P , pero esta vez contiene un mandril interno el cual soportará parte de la carga P , resultando la elipse menos pronunciada y por último en la figura 2.15.d, se le aplica también la misma carga P , pero esta vez con un mandril de mayor diámetro que el anterior, resultando la forma elíptica menor pronunciada aún. Entonces se puede entender fácilmente que para en caso 2.15 b el tubo reaccionará con una carga igual y opuesta P .

En el caso 2.15.c, la carga externa P será compensada por dos cargas:

$$P = P_{T1} + P_{M1} \quad (N) \quad (2.42)$$

P_{T1} es la porción de la carga P que soportará el tubo en la figura 2.15.c.

P_{M1} es la porción de la carga P que soportará el mandril en la figura 2.15.c.

En el caso 2.15.d, la carga externa P será compensada por dos cargas también:

$$P = P_{T2} + P_{M2} \quad (N) \quad (2.43)$$

P_{T2} es la porción de la carga P que soportará el tubo en la figura 2.15.d.

P_{M2} es la porción de la carga P que soportará el mandril en la figura 2.15.d.

Observando las figuras 2.15.c y 2.15.d es fácil observar que:

$$P_{M2} > P_{M1} \quad (N) \quad (2.44)$$

$$P_{T1} > P_{T2} \quad (N) \quad (2.45)$$

Entonces de esta manera es obvio establecer que la presión interna es inversamente proporcional a la holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo.

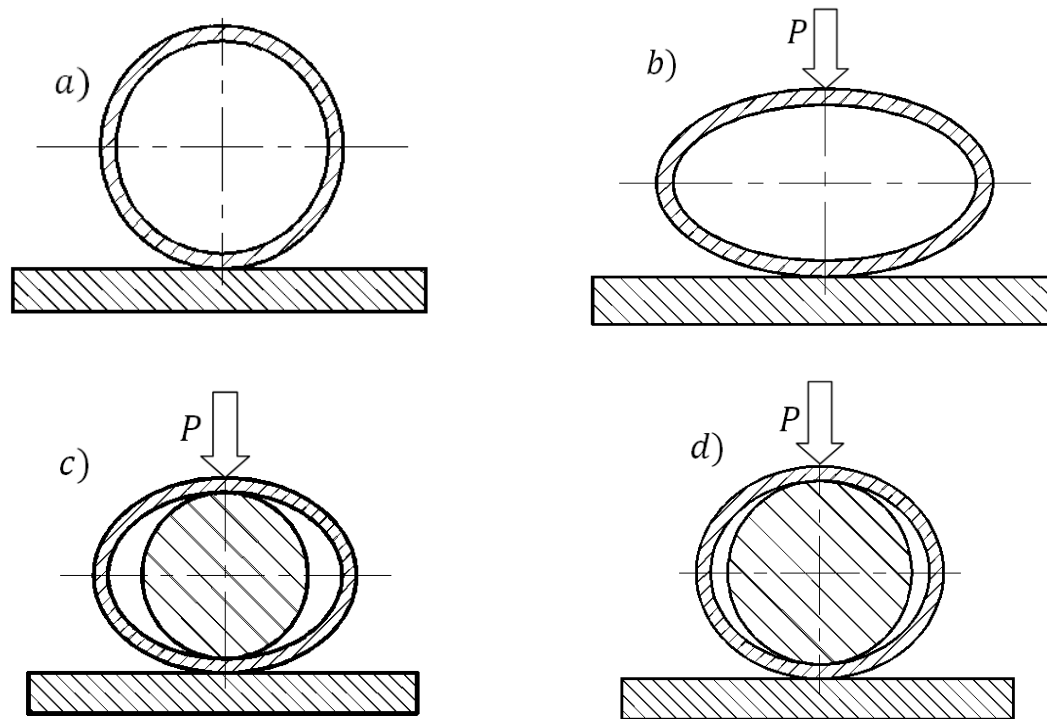


Figura 2.15 Variaciones de las holguras

2.7.1 Cálculo de la holgura entre el diámetro interno del tubo y el mandril

La excentricidad entre el diámetro interno del tubo y el mandril es la mitad de la holgura entre estos, y se puede determinar mediante el siguiente procedimiento:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r_m} - \frac{1}{r_i} \quad (mm) \quad (2.47)$$

En donde:

r_i es el radio del orificio del tubo y se puede considerar como el radio de la curvatura elíptica del tubo después de que éste es deformado por la carga P entre los dados de presión y soporte, debido a que la holgura $2\Delta_c$ no es muy grande.

r_m es el radio del mandril. (Ver figura 2.16).

ρ es el radio de la curvatura equivalente, y se puede calcular según Ivanov [189]:

Entonces:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{r_i - r_m}{r_m r_i} \quad (mm) \quad (2.48)$$

Y:

$$\rho = \frac{r_m r_i}{r_i - r_m} \quad (mm) \quad (2.49)$$

Entonces:

$$\rho = \frac{(r_i - 2\Delta_c)r_i}{r_i - (r_i - 2\Delta_c)} \quad (mm) \quad (2.50)$$

Δ_c es la excentricidad entre el diámetro interno del tubo y el mandril (ver figura 2.16).

Por consiguiente:

$$\rho = \frac{r_i^2 - 2r_i\Delta_c}{2\Delta_c} \quad (mm) \quad (2.51)$$

Y:

$$2\rho\Delta_c = r_i^2 - 2r_i\Delta_c \quad (mm) \quad (2.52)$$

Entonces:

$$2\Delta_c(\rho + r_i) = r_i^2 \quad (mm) \quad (2.53)$$

Y:

$$\Delta_c = \frac{r_i^2}{2(\rho + r_i)} \quad (mm) \quad (2.54)$$

La relación entre el radio ρ y las condiciones de doblado se puede calcular según Ivanov por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{q_M}{\sigma_H^2} * \frac{E_{eqv}}{2\pi(1 - \mu^2)} \quad (m) \quad (2.55)$$

En donde q_M es la carga por unidad de longitud aplicada al tubo por el mandril, (Ver figura 2.17) y se calcula:

$$q_M = \frac{P_M}{l} \quad (N/m) \quad (2.56)$$

l es la longitud del mandril.

σ_H es el esfuerzo de contacto entre las superficies del mandril y la superficie interna del tubo, se puede considerar que: $\sigma_H = P_i$.

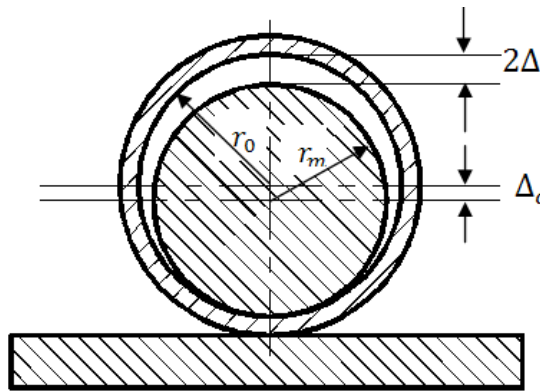


Figura 2.16 Holgura y excentricidad entre el tubo y el mandril

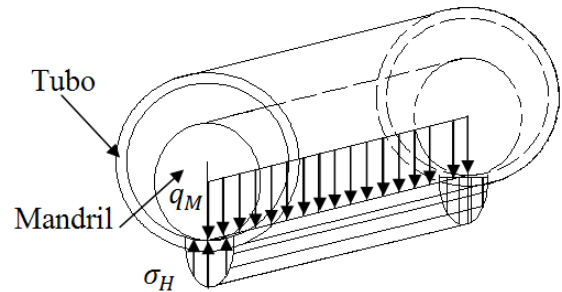


Figura 2.17 Carga por unidad de longitud q_M y el esfuerzo superficial σ_H entre el mandril y la superficie interna del tubo

E_{eqv} es el módulo elástico equivalente, y se calcula:

$$E_{eqv} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2} \quad \left(\frac{N}{m^2}\right) \quad (2.57)$$

E_1 y E_2 son los módulos elásticos de los materiales del tubo y el mandril.

μ es el coeficiente de Poisson.

El valor de q_M es diferente en cada caso en particular, dependientemente del diámetro, espesor de pared y material del tubo. Para determinar q_M es necesario determinar la relación entre q_T y Δ_c , o sea:

$$q_T = f(\Delta_c) = K^1 \Delta_c \quad \left(\frac{N}{m}\right) \quad (2.58)$$

q_T es la porción de la carga P ejercida por los dados de presión y soporte sobre el tubo por unidad de longitud del mandril.

K^1 es la pendiente que relaciona q_T y Δ_c . El valor de esa pendiente depende de la geometría y material del tubo. Esa relación se puede ver en la figura 2.18, y se puede obtener con ayuda del software Solid Simulation, ver figura 2.19.

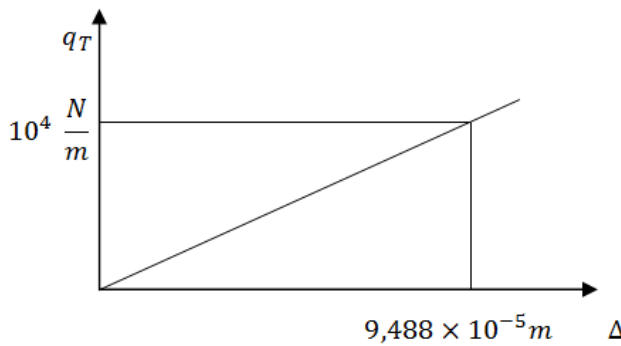


Figura 2.18 Relación entre q_T y Δ_c

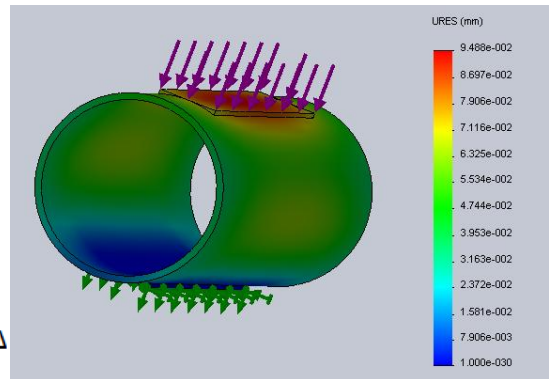


Figura 2.19 Relación entre q_T y Δ_c obtenida Solid Simulation 2010

Si se divide la ecuación (2.42) entre la longitud del mandril l y se obtiene:

$$q = q_T + q_M \quad \left(\frac{N}{m}\right) \quad (2.59)$$

q es la carga P , distribuida en el tubo a lo largo de la longitud del mandril.

q_T es la porción de esa carga q que soporta la pared del tubo.

Entonces se tiene:

$$q_M = q - q_T \quad (N/m) \quad (2.60)$$

Se sustituye la ecuación (2.58) en la (2.60)

$$q_M = q - K^1 \Delta_c \quad (N/m) \quad (2.61)$$

Y la ecuación (2.61) en la (2.55)

$$\rho = \frac{q - K^1 \Delta_c}{\sigma_H^2} * \frac{E_{eqv}}{2\pi(1 - \mu^2)} \quad (m) \quad (2.62)$$

Y la ecuación (2.62) se iguala a la ecuación (2.51)

$$\frac{r_i^2 - 2r_i \Delta_c}{2\Delta_c} = \frac{q - K^1 \Delta_c}{\sigma_H^2} * \frac{E_{eqv}}{2\pi(1 - \mu^2)} \quad (mm) \quad (2.63)$$

Entonces:

$$r_i^2 - 2r_i \Delta_c = \frac{2\Delta_c q - 2K^1 \Delta_c^2}{\sigma_H^2} * \frac{E_{eqv}}{2\pi(1 - \mu^2)}$$

Y:

$$r_i^2 - 2r_i \Delta_c = (2\Delta_c q - 2K^1 \Delta_c^2) * \frac{E_{eqv}}{\sigma_H^2 2\pi(1 - \mu^2)}$$

Entonces:

$$r_i^2 - 2r_i \Delta_c - (2\Delta_c q - 2K^1 \Delta_c^2) * \frac{E_{eqv}}{\sigma_H^2 2\pi(1 - \mu^2)} = 0$$

Y:

$$\frac{E_{eqv} K^1}{\sigma_H^2 \pi(1 - \mu^2)} \Delta_c^2 - \left[\frac{E_{eqv} q}{\sigma_H^2 \pi(1 - \mu^2)} + 2r_i \right] \Delta_c + r_i^2 = 0$$

Y:

$$a\Delta_c^2 - b\Delta_c + c = 0 \quad (mm) \quad (2.64)$$

Para las condiciones de doblado especificadas en el punto 2.6.2 este cálculo da el siguiente resultado:

$$a = \frac{2,05 \times 10^{11} \text{Pa} \times 1,054 \times 10^8 \text{ Pa}}{(16 \times 10^6 \text{Pa})^2 \pi (1 - 0,3^2)} = 29\,523,2 \quad (-)$$

$$b = -\frac{2,05 \times 10^{11} \text{Pa} \times 92363 \text{ N/m}}{(16 \times 10^6 \text{Pa})^2 \pi (1 - 0,3^2)} - 0,0118 \text{m} = -25,88 \quad (\text{m})$$

$$c = r_i^2 = 1,3924 \times 10^{-4} \quad (\text{m}^2)$$

Y el resultado de la ecuación de segundo grado:

$$\Delta_{c1} = 8,7 \times 10^{-4}; \Delta_{c2} = 5,41 \times 10^{-6} \quad (\text{m})$$

Y entonces la excentricidad : $\Delta_c = 5,41 \times 10^{-3} \text{ mm}$, y la holgura $2\Delta_c = 0,011 \text{ mm}$

Como ambos materiales tanto el tubo como el mandril son hechos de acero, entonces se puede considerar que: $E_{\text{eqv}} = E = 2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

K^1 se determina mediante la modelación en el Solid Simulation, en la figura 2.18 se puede observar que esa relación es lineal y:

$$K^1 = \text{tg } \vartheta = \frac{q_T}{\Delta_c} = \frac{10^4 \text{ N/m}}{9,4884 \times 10^{-5} \text{ m}} = 1,054 \times 10^8 \quad \text{N/m}^2 \quad (2.65)$$

Y q se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$q = \frac{P}{l} \quad \text{N/m} \quad (2.66)$$

Entonces:

$$q = \frac{9236,3 \text{ N}}{0,1 \text{ m}} = 92363 \quad \text{N/m}$$

La longitud del mandril para el ejemplo ilustrado es igual a 10 cm.

Y la carga P por definición se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{f} \quad N \quad (2.67)$$

Y:

$$P = \frac{2\sigma_{xf}\pi tr}{f} = \frac{2 * 40 \times 10^6 \text{ N/m}^2 * \pi * 0,0009 \text{ m} * 0,01225}{0,3} = 9236,3 \text{ N} \quad N$$

f es el coeficiente de roce entre los dados soporte y de presión y el tubo, según recomendaciones Ivanov [189].

Ya que el mandril debe entrar en el tubo con holgura garantizada, entonces a la holgura calculada se le debe adicionar los valores de los defectos geométricos del tubo en la parte interna de este.

Este cálculo se puede simplificar si se considera que $q_M \cong q$, entonces: la ecuación (2.55) se escribe:

$$\rho = \frac{q}{\sigma_H^2} * \frac{E_{eqv}}{2\pi(1 - \mu^2)} \quad (m)$$

Y el valor obtenido se sustituye en la ecuación (2.54).

Conclusiones del capítulo II

- 1) Wang no considera la influencia que tiene la carga axial, la presión interna, el factor de pared WF , y el material en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva del tubo. También en la expresión para calcular el desplazamiento de la línea neutra comete un error al tomar el ángulo φ desde el eje vertical (ver figuras 1.2 y 2.6) y otro error al utilizar la función coseno del ángulo en lugar del seno. Considera además que la condición para la cual no habrá formación de

arrugas es cuando el factor de doblado es mayor a 2, o sea, $DOB = R/D > 2$, lo cual constituye un error, pues pueden surgir arrugas para valores de $DOB > 2$, y también podrían no haber arrugas para casos en que $DOB < 2$, dependientemente de las cargas aplicadas, el factor de pared y el material de trabajo.

- 2) Agarwal utiliza un modelo matemático parecido al de Wang. En algunas experimentaciones le asigna valores iguales a cero a la presión interna y a la carga axial, lo cual constituye un error, ya que la existencia de estas cargas determina la esencia del método de doblado por arrastre. Tampoco considera la influencia que tiene la carga axial, la presión interna, el factor de pared WF , y el material en el análisis del fenómeno de la formación de arrugas en la parte interna de la curva del tubo. También comete el mismo error de Wang en la expresión para calcular el desplazamiento de la línea neutra al tomar el ángulo φ desde el eje vertical (ver figuras 1.2 y 2.6) y otro error al utilizar la función coseno del ángulo en lugar del seno. Al igual que Wang, considera que la condición para la cual no habrá formación de arrugas es cuando el factor de doblado es mayor a 2, o sea, $DOB = R/D > 2$. Las ecuaciones de Agarwal para el cálculo de las variaciones del espesor y el radio, arrojan valores inconsistentes con los resultados experimentales.
- 3) Se establece los valores de las fronteras de los esfuerzos:
 - a) Esfuerzo axial σ_{xf}
 - b) Presión interna P_i
- 4) Se establece la relación entre la magnitud de la presión interna y la magnitud de la holgura entre el tubo y el mandril.

CAPÍTULO III

3. PROCEDIMIENTOS PARA LA CONCEPCIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL PROCESO DE DOBLADO DE TUBOS POR ARRASTRE

3.1 Introducción:

En un problema de optimización multiobjetivo se trata de encontrar una solución que represente el mejor valor (valor óptimo) para una función objetivo [190, 191]. La noción más aceptada de "óptimo" en el entorno de problemas multiobjetivo es la propuesta originalmente por Francis Ysidro Edgeworth en 1881 y generalizada posteriormente por Wilfredo Pareto en 1896 [177]. En términos matemáticos, el problema de optimización multiobjetivo, puede establecerse de la siguiente forma:

Encontrar un vector $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$, que satisfaga las m restricciones:

$$g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.1)$$

y las p restricciones:

$$h(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (3.2)$$

y optimice la función vectorial:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots \dots \dots f_k(x)]^T \quad (3.3)$$

Donde:

$$x = [x_1, x_2, \dots \dots \dots x_n]^T \quad (3.4)$$

Es el vector de variables de decisión, o sea, se requiere determinar la solución particular, $x_1^*, x_2^*, \dots \dots x_n^*$ del conjunto S formado por todos los valores que satisfacen (3.1) y (3.2), que dé lugar a los valores óptimos para todas las funciones objetivo.

3.2 Solución del problema usando el método de las aproximaciones sucesivas (Chevichev) y el software Mathematical

Según se concluye en el Capítulo I, en el desarrollo de procedimientos de preparación adecuados para la fabricación por doblado de tubos se requiere de la aplicación de metodologías de preparación y toma de decisiones que integren métodos de la Teoría de Sistemas, la simulación de procesos por procedimientos de alta complejidad y optimización y representación gráfica. En calidad de tal procedimiento se aplica, en lo adelante, la metodología de Análisis y Síntesis de Sistemas que aparece en [122]

3.2.1 Análisis externo del proceso de fabricación como tarea de Preparación y Toma de Decisiones.

Tarea de mayor envergadura:

La tarea de mayor envergadura asociada al proceso de fabricación está constituida por el proceso general de fabricación de artículos de todo tipo que determinan la configuración de

las piezas tubulares a ser dobladas. De tal manera, se seleccionan como variables de coordinación las siguientes:

- Material a doblar
- Radio de doblado (R)
- Diámetro del Tubo a doblar (D)
- Espesor del tubo (t)
- Angulo de doblez

Según se esclarece en el Capítulo I entre los defectos más comunes de fabricación por doblado de tubos se presentan como los más comunes, intrínsecos al proceso, los siguientes: el adelgazamiento del espesor de la pared del tubo en la parte externa de la curva, el aplanamiento en la pared del tubo y la formación de arrugas en la pared interna de la curva. Los indicadores técnicos y económicos del proceso de fabricación se determinan por la minimización del efecto conjunto de estos defectos durante la fabricación. Así, se seleccionan como Indicadores de eficiencia, los siguientes:

- Mínimo adelgazamiento
- Mínimo aplanamiento
- Mínima arruga

Las variables que pueden ser gobernadas a voluntad durante la fabricación se encuentran la presión interna, el esfuerzo axial y la velocidad angular de giro del dado curvo. Sin embargo, aunque esta última variable adopta en las instalaciones predominantes el valor de entre 1,6 y 0,1 rad/seg [86, 96-106], (de acuerdo al diámetro del tubo y radio del dado curvo) la velocidad angular no se considera como variable, ya que debido a la variación de

los radios del dado curvo, esa velocidad permanece casi constante para todos los casos y además, el modelo matemático implementado no considera ni el coeficiente, ni el exponente de endurecimiento por deformación. De tal forma que, se seleccionan como variables de decisión para la planeación del proceso de fabricación las siguientes:

- Presión interna (P_i)
- Esfuerzo axial (σ_{xf})

Variables intermedias de interés

Para la solución de la tarea estudiada resulta indispensable la determinación de los intervalos límites de definición de las variables de decisión, y aquellas variables que determinan los valores de adelgazamiento, aplanamiento y arruga del tubo doblado.

Así, se consideran como variables intermedias de interés, las siguientes:

- Presión interna mínima indispensable
- Presión interna máxima permisible
- Esfuerzo axial mínimo indispensable
- Esfuerzo axial máximo indispensable
- Grado de doblado $DOD = \frac{R}{D}$
- Factor de pared $WF = \frac{D}{t}$

3.3 Modelo matemático conceptual:

De la clasificación de variables realizadas se deduce el siguiente modelo matemático:

$$\text{Minimizar } Z = \max [w_1(f_t - f_{td}), w_2(f_p - f_{pd}), w_3(f_w - f_{wd}),] \quad (-) \quad (3.5)$$

En donde:

f_t es la función de adelgazamiento.

f_p es la función de aplanamiento.

f_w es la función de arrugas.

Las expresiones $f_i d$ son los valores deseados para cada función objetivo.

Las expresiones w_i son los valores de los pesos para cada función objetivo.

Asegurando:

$$P_i^{inf} \leq P_i \leq P_i^{sup} \quad (MPa) \quad (3.6)$$

$$\sigma_{xf}^{inf} \leq \sigma_{xf} \leq \sigma_{xf}^{sup} \quad (MPa) \quad (3.7)$$

Donde:

$P_i, P_i^{inf}, P_i^{sup}$ es la presión interna en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

$\sigma_{xf}, \sigma_{xf}^{inf}, \sigma_{xf}^{sup}$ es el esfuerzo axial en el tubo y sus valores admisibles inferior y superior, respectivamente.

La expresión (3.5) expresa la intención de buscar un compromiso razonable entre el adelgazamiento, el aplanamiento y las arrugas en la pieza terminada.

Las expresiones (3.6) y (3.7) expresan la necesidad de que la presión interna del tubo y el esfuerzo axial se encuentren entre límites inferiores y superiores admisibles.

El modelo (3.5) – (3.7) es resultado del análisis externo realizado, por lo que requiere ser identificado. Esta identificación, así como la determinación de los procedimientos complementarios que pudieran ser requeridos para completar la descripción del proceso, constituyen parte componente del análisis interno de la tarea.

3.4 Determinación de las funciones objetivo

Las funciones objetivos son:

- 1) Función adelgazamiento
- 2) Función aplanamiento
- 3) Función arrugas

La función de adelgazamiento se puede establecer de la siguiente manera:

$$f_t = \frac{t - t_\alpha}{t} \quad (-) \quad (3.8)$$

Ya que el análisis del adelgazamiento se lleva a cabo en la posición más delgada, o sea para $\alpha = 0$, entonces $\sigma_{xm} = Y$, y sustituyendo esos valores y la ecuación (2.21) en la ecuación (2.29), esta toma la siguiente forma:

$$t_0 = \left\{ 1 - \frac{(Y + \sigma_{xf}) + 3 \frac{P_i r}{2t}}{2(Y + \sigma_{xf})} \left[\frac{r}{R} \left(1 + \frac{\pi \sigma_{xf}}{Y} \right) \right] \right\} t \quad (mm) \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ecuación (3.9) en la (3.8) se obtiene la función adelgazamiento:

$$f_t = \frac{(Y + \sigma_{xf}) + 3 \frac{P_i r}{2t}}{2(Y + \sigma_{xf})} \times \frac{r}{R} \left(1 + \frac{\pi \sigma_{xf}}{Y} \right) \quad (-) \quad (3.10)$$

La función aplanamiento según Agarwal [44] se puede establecer de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (-) \quad (3.11)$$

El diámetro máximo está ubicado en donde el radio es mayor, eso ocurre en el sitio donde $\alpha = \pi/2$ y $\alpha = 3\pi/2$, entonces:

$$D_{max} = 2r_{amax} = 2r_{\pi/2} \quad (mm) \quad (3.12)$$

Se sustituye α por $\pi/2$ y la ecuación (2.21) en la ecuación (2.32) y se tiene:

$$r_{\pi/2} = \left[1 - \frac{(\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf})(2K_{\pi/2} - 1) + \frac{P_i r}{2t}(2K_{\pi/2} + 3)}{(\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf})(K_{\pi/2} - 2) + \frac{P_i r}{2t}K_{\pi/2}} \times \frac{\pi r \sigma_{xf}}{RY} \right] r \quad (mm) \quad (3.13)$$

Entonces se sustituye la ecuación (3.13) en la (3.12):

$$D_{max} = 2 \left[1 - \frac{(\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf})(2K_{\pi/2} - 1) + \frac{P_i r}{2t}(2K_{\pi/2} + 3)}{(\sigma_{xm\pi/2} + \sigma_{xf})(K_{\pi/2} - 2) + \frac{P_i r}{2t}K_{\pi/2}} \times \frac{\pi r \sigma_{xf}}{RY} \right] r \quad (mm) \quad (3.14)$$

Se sustituye α por $\pi/2$ en la ecuación (2.9) y se obtiene:

$$K_{\pi/2} = \ln \frac{R + r}{R} \quad (-) \quad (3.15)$$

Y se sustituye la ecuación (2.63) en la (2.18) y se obtiene:

$$\sigma_{xm\pi/2} = \frac{Y}{\sqrt{K_{\pi/2}^2 - K_{\pi/2} + 1}} \quad (N/m^2) \quad (3.16)$$

El diámetro mínimo de la curva es la suma de los radios más pequeños, en donde $\alpha = 0$, y

$\alpha = \pi$, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$D_{min} = r_0 + r_{\pi} \quad (mm) \quad (3.17)$$

Sustituyendo: $\alpha = 0$ y la ecuación (2.21) en la ecuación (2.38) y se obtiene que: $\sigma_{xm} = Y$

y $K = 0$, entonces:

$$r_0 = \left[1 - \frac{(Y + \sigma_{xf}) - 3\frac{P_i r}{2t}}{2(Y + \sigma_{xf})} \times \frac{r}{R} \left(1 + \frac{\pi \sigma_{xf}}{Y} \right) \right] r \quad (mm) \quad (3.18)$$

Para calcular r_{π} según Wang se sustituye α por π y la ecuación (2.21) en la ecuación (2.39)

y se obtiene:

$$r_{\pi} = \left[1 - \frac{(\sigma_{xm\pi} - \sigma_{xf})(2K_{\pi} - 1) + \frac{P_i r}{2t}(2K_{\pi} + 3)}{(\sigma_{xm\pi} - \sigma_{xf})(K_{\pi} - 2) - \frac{P_i r}{2t}K_{\pi}} \left(\frac{\pi r \sigma_{xf}}{RY} - \frac{r}{R} \right) \right] r \quad (mm) \quad (3.19)$$

Y sustituyendo $\alpha = \pi$ en la ecuación (2.9) se obtiene:

$$K_{\pi} = \ln \frac{R + r}{R - r} \quad (-) \quad (3.20)$$

Y la ecuación (3.19) en la (2.16) se obtiene:

$$\sigma_{xm\pi} = \frac{Y}{\sqrt{K_{\pi}^2 - K_{\pi} + 1}} \quad (N/m^2) \quad (3.21)$$

La función arrugas se puede establecer de la siguiente manera:

$$f_w = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{ximax}} \quad (-) \quad (3.22)$$

El análisis de la formación de arrugas se lleva a cabo en la posición donde el esfuerzo normal a compresión es mayor, o sea en la parte interna de la curva en donde $\alpha = \pi$, entonces:

σ_{xi} – Esfuerzo variable a compresión en la parte interna de la curva

$$\sigma_{xi} = -\frac{Y}{\sqrt{K_{\pi}^2 - K_{\pi} + 1}} + \sigma_{xf} + \frac{P_i r}{2t} \quad (N/m^2) \quad (3.23)$$

σ_{ximax} es el esfuerzo máximo a compresión en la parte interna de la curva, y se puede determinar de la siguiente manera:

$$\sigma_{ximax} = -\frac{Y}{\sqrt{K_{\pi}^2 - K_{\pi} + 1}} + \sigma_{xfmin} + \frac{P_{imin} r}{2t} = \text{valor constante} \quad (N/m^2) \quad (3.24)$$

En donde:

σ_{xfmin} es el mínimo esfuerzo a tracción en el tubo.

P_{imin} es la presión mínima interna en el tubo.

3.5 Las restricciones

Las restricciones se seleccionan de acuerdo al criterio del autor de este trabajo y de los valores de los parámetros geométricos de los tubos normalizados comercializados en La República Bolivariana de Venezuela. Tales valores se pueden ver en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Variables de coordinación y límites de las variables de decisión para el doblado de tubo de diferentes materiales

Material	-	Acero AISI 1020 laminado en frio
Radio de doblado	R	50,8 mm.
Espesor de pared	t	0,9 mm
Límite de fluencia del material	Y	350 MPa
Diámetro del tubo	D	25,4 mm
Radio medio del tubo	r	12,25 mm
Esfuerzo axial	σ_{xf}	(30 ÷ 50) MPa
Presión interna	P_i	(14 ÷ 18) MPa
Material	-	Cobre 2.0090 (Cu DHP) para deformación en frio
Radio de doblado	R	57,15 mm
Espesor de pared	t	1,5875 mm
Límite de fluencia del material	Y	210 MPa
Diámetro del tubo	D	28,575 mm
Radio medio del tubo	r	13,49375 mm
Esfuerzo axial	σ_{xf}	(18 ÷ 30) MPa
Presión interna	P_i	(13,35 ÷ 18,44) MPa
Material	-	Aleación de aluminio 3.0517 (EN-AW 3003)
Radio de doblado	R	101,6 mm
Espesor de pared	t	3 mm
Límite de fluencia del material	Y	350 MPa
Diámetro del tubo	D	50,8 mm
Radio medio del tubo	r	23,9 mm
Esfuerzo axial	σ_{xf}	(30 ÷ 50) MPa
Presión interna	P_i	(23,7 ÷ 32,8) MPa
Material	-	Acero inoxidable al cromo
Radio de doblado	R	76,2 mm
Espesor de pared	t	2,4 mm
Límite de fluencia del material	Y	172,339 MPa
Diámetro del tubo	D	38,1 mm
Radio medio del tubo	r	17,85 mm
Esfuerzo axial	σ_{xf}	(15 ÷ 25) MPa
Presión interna	P_i	(12,75 ÷ 17,57) MPa

3.6 El algoritmo utilizado

El algoritmo utilizado se puede observar en la figura 3.1 y funciona de la siguiente manera: primeramente se hace una partición de los intervalos de valores de las variables de decisión, tal como se ilustra en la figura 3.2. Luego el software realiza los cálculos de las tres funciones f_t , f_p y f_w , como se plantea en las ecuaciones 3.8, 3.11 y 3.22, con los valores de las variables ubicados en los puntos 1,1; 1,2; 2,1 y 2,2 de los dos intervalos, obteniéndose así doce cálculos para la primera iteración, cuatro por cada función, se seleccionan y se guardan los valores máximos de cada función y luego se selecciona el mínimo de los máximos de las funciones, siendo en esa primera iteración la función óptima temporalmente. Entonces de acuerdo a la posición de la función óptima se desechan dos segmentos de los intervalos, tal como se ilustra en la figura 3.3. Luego el algoritmo hace una nueva partición de los dos segmentos que quedaron en tres partes de una manera análoga, para la cual encuentra una nueva función óptima temporal y así sucesivamente hasta que el intervalo ΔP_i ó $\Delta \sigma_{xf}$ se hace muy pequeño, por ejemplo 10^{-3} . La posición de las variables de decisión en la última iteración, representa la posición final, los valores de las funciones en la posición de las variables de decisión respecto a los valores deseados es la solución óptima buscada.

En donde el procedimiento inicial del algoritmo se puede observar en la figura 3.4

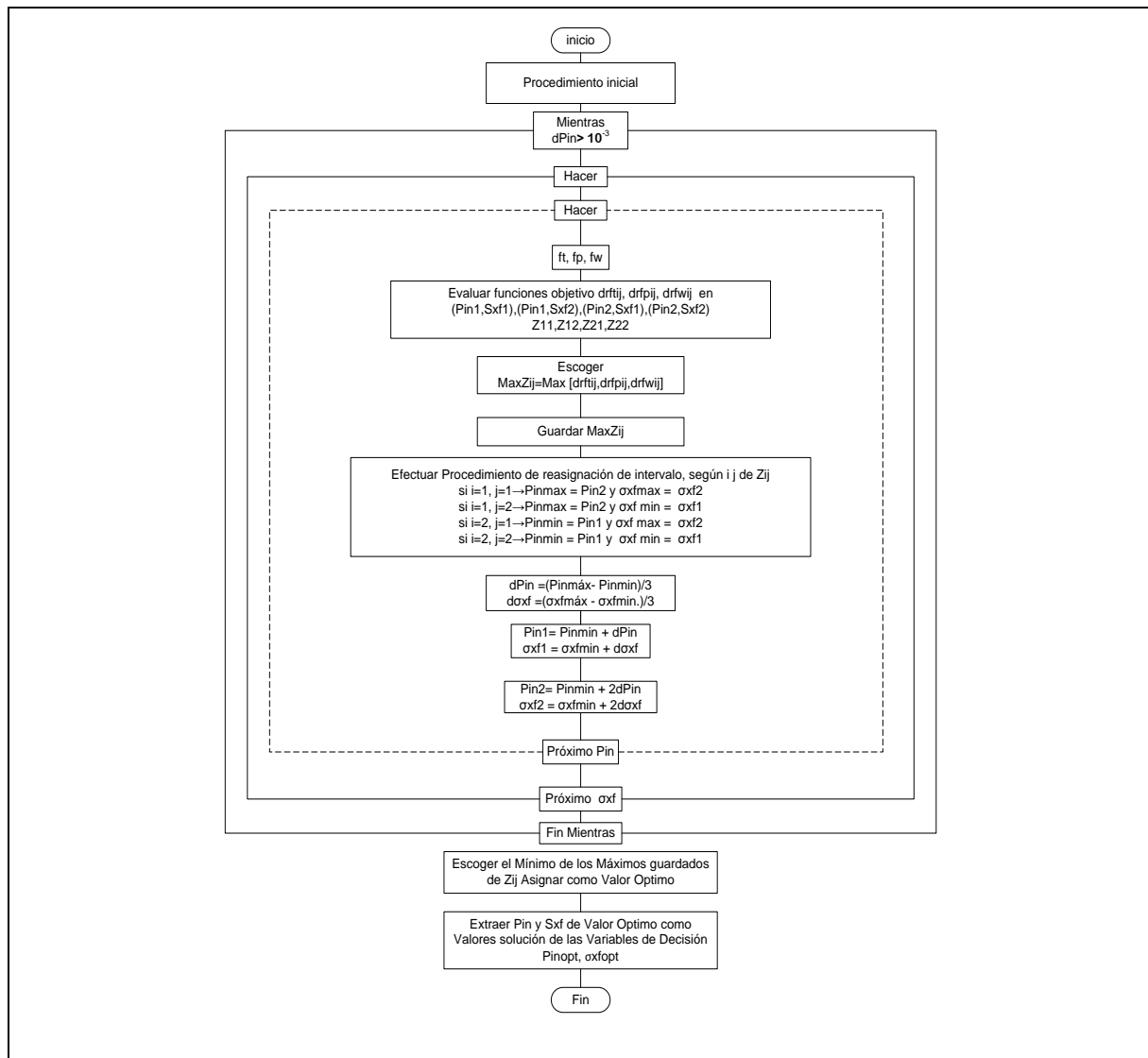


Figura 3.1 Estructura Central del algoritmo

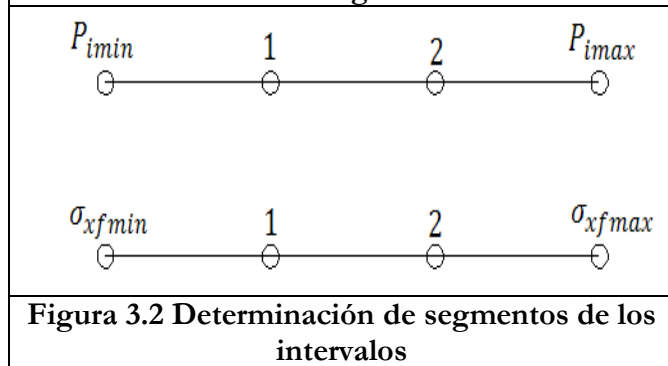


Figura 3.2 Determinación de segmentos de los intervalos

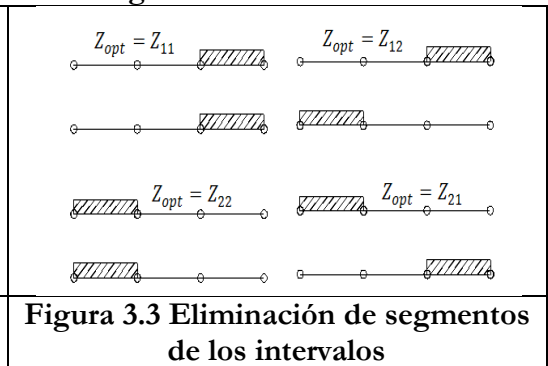


Figura 3.3 Eliminación de segmentos de los intervalos

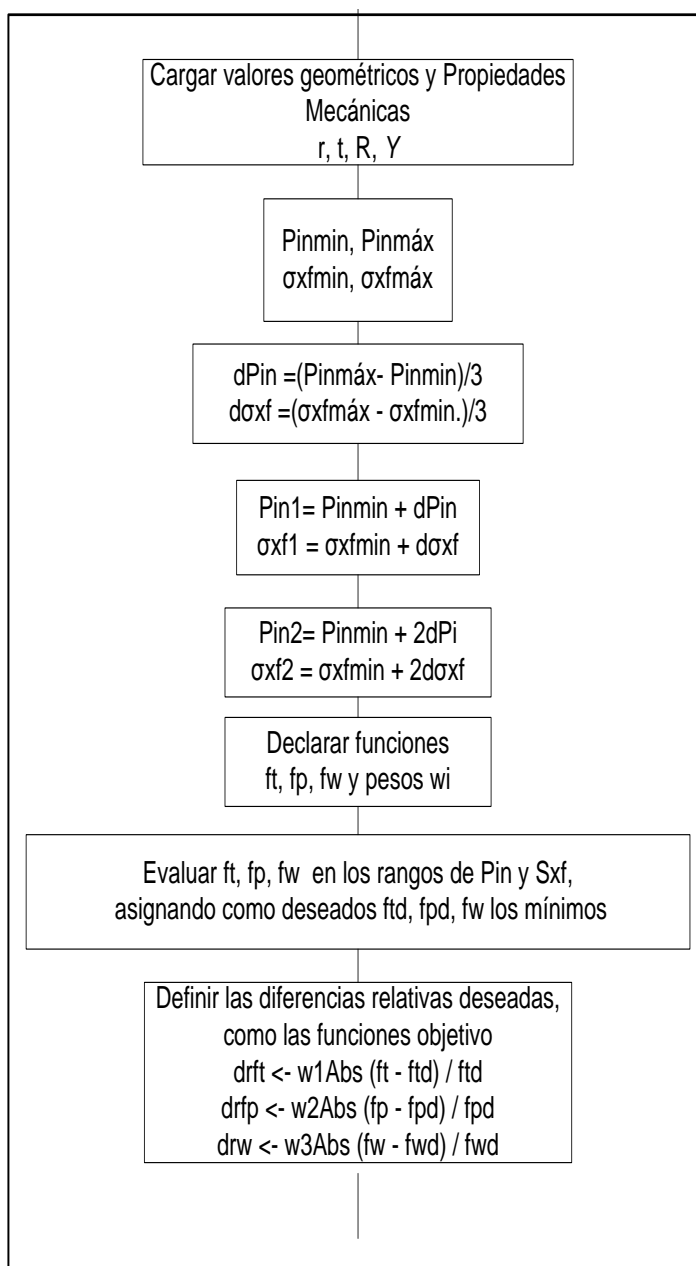


Figura 3.4 Procedimiento inicial del algoritmo

3.7 Resultados del análisis del doblado de tubos:

3.7.1 Resultados de las corridas en el software MATHEMATICAL® 7 de las funciones objetivo en relación a las cargas P_i y σ_{xf} con los materiales especificados en la tabla 3.2

En las figuras (3.5), - (3.16) se muestran los resultados de las corridas del programa

MATHEMATICA7 para las tres funciones objetivo, para cada uno de los materiales seleccionados. (Ver anexo IV)

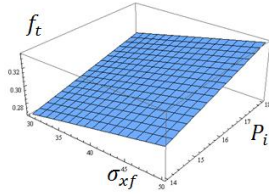


Figura 3.5 Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (acero)

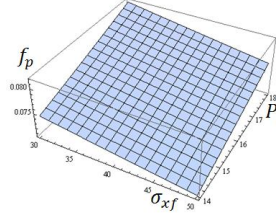


Figura 3.6 Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (acero)

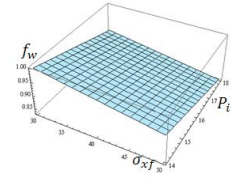


Figura 3.7 Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (acero)

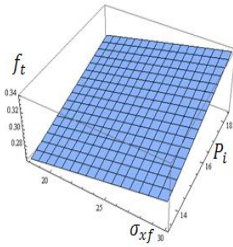


Figura 3.8 Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (cobre)

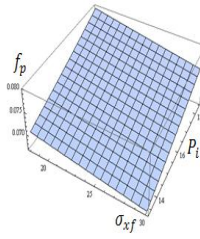


Figura 3.9 Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (cobre)

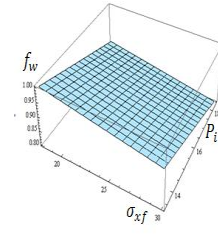


Figura 3.10 Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (cobre)

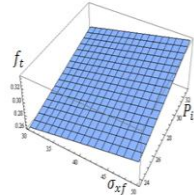


Figura 3.11 Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)

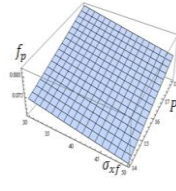


Figura 3.12 Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)

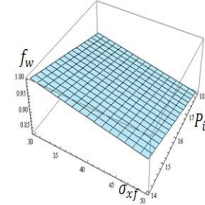


Figura 3.13 Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (aluminio)

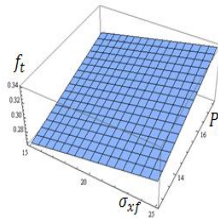


Figura 3.14 Variación de f_t en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)

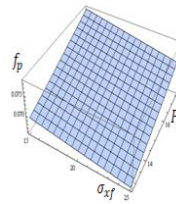


Figura 3.15 Variación de f_p en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)

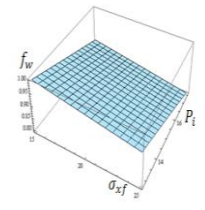


Figura 3.16 Variación de f_w en función de P_i y σ_{xf} (acero inoxidable)

En las figuras (3.5), (3.8), (3.11) y (3.14) se puede observar que las funciones f_t mejoran (disminuyen) cuando la presión interna P_i y la carga axial σ_{xf} son mínimas.

En la figura (3.6), (3.9), (3.12) y (3.15) se puede observar que las funciones f_p mejoran

(disminuyen) con la máxima carga axial σ_{xf} y la mínima presión interna P_i .

En las figuras (3.7), (3.10), (3.13) y (3.16) se puede observar que las funciones f_w mejoran (disminuyen) con el incremento de la presión interna P_i , y la carga axial σ_{xf} .

El rango de la presión interna P_i se calcula por la ecuación (2.40) y el rango del esfuerzo axial en σ_{xf} por la ecuación (2.38). En la tabla 3.2 se especifica los valores de las variables de coordinación utilizadas

3.7.2 Resultados del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el software MATHEMATICAL® 7

El modelo de optimización matemática se realizó según el método de Chevichev e implementado luego en el software MATHEMATICAL, se utiliza un diseño de experimento factorial, en donde los intervalos de valores de las funciones objetivo f_i se dividen en tres segmentos iguales, cuatro puntos 1, 2, 3 y 4 de menor a mayor, a cada función se le asigna las letras i , j y k respectivamente, los valores $f_t d$, $f_p d$ y $f_w d$ ocupan las posiciones 1, 2, 3 y 4 eventualmente resultando 18 combinaciones (ver tablas 3.2, 3.4, 3.6 y 3.8). A todos los pesos se les asignó el valor unitario $w_i = 1$ y las expresiones $f_i O$ representan los valores óptimos de cada función objetivo para cada combinación de posiciones. Se puede observar en las primeras 6 corridas para cada material, en donde $f_t d$ ocupa la posición mínima, que los valores de P_i tienden a los valores medios y mínimos, σ_{xf} tiende hacia los límites mínimos independientemente de la posición de las demás $f_i d$. Se puede observar en las segundas 6 corridas para cada material, en donde $f_p d$ ocupa la posición mínima, que los valores de P_i tienden a los medios y mínimos y σ_{xf} varían de

mínimos a máximos dependientemente de la posición de las demás $f_i d$.

En las últimas 6 corridas en donde $f_w d$ ocupa la posición mínima, los valores de P_i toman los valores máximos y σ_{xf} tienden a tomar los valores medios y máximos dependientemente de la posición de las demás $f_i d$. (Ver anexo V)

3.7.3 Verificación del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el software MATHEMATICAL

Se realizaron las mismas corridas en el software por el mismo método implementado en el Mathematical en análogas condiciones y se obtuvo los siguientes resultados de las tablas 3.3, 3.5, 3.7 y 3.9. (Ver anexo VI)

Tabla 3.2 Resultados del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de acero 1020 (Procedimiento figura 3.4)

id	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	i	j	k
1	15.75758	30.00000	0.28260	0.07759	0.95710	0.26815	0.07419	0.94355	1	2	3
2	14.00000	30.00000	0.26815	0.07449	1.00000	0.26815	0.07419	1.00000	1	2	4
3	17.45455	30.00000	0.29656	0.08074	0.91569	0.26815	0.07798	0.88710	1	3	2
4	14.12121	30.00000	0.26915	0.07470	0.99704	0.26815	0.07798	1.00000	1	3	4
5	17.45455	30.00000	0.29656	0.08074	0.91569	0.26815	0.08178	0.88710	1	4	2
6	15.75758	30.00000	0.28260	0.07759	0.95710	0.26815	0.08178	0.94355	1	4	3
7	14.12121	44.54545	0.29211	0.07169	0.94488	0.29049	0.07039	0.94355	2	1	3
8	14.00000	34.24242	0.27489	0.07360	0.98479	0.29049	0.07039	1.00000	2	1	4
9	15.63636	50.00000	0.31410	0.07301	0.88834	0.31283	0.07039	0.88710	3	1	2
10	14.12121	37.87879	0.28166	0.07305	0.96879	0.31283	0.07039	1.00000	3	1	4
11	16.30303	50.00000	0.32004	0.07412	0.87207	0.33517	0.07039	0.88710	4	1	2
12	14.60606	50.00000	0.30491	0.07135	0.91349	0.33517	0.07039	0.94355	4	1	3
13	18.00000	41.51515	0.32085	0.07900	0.86108	0.29049	0.07798	0.83065	2	3	1
14	18.00000	41.51515	0.32085	0.07900	0.86108	0.29049	0.08178	0.83065	2	4	1
15	18.00000	45.75758	0.32804	0.07800	0.84587	0.31283	0.07419	0.83065	3	2	1
16	18.00000	45.75758	0.32804	0.07800	0.84587	0.31283	0.08178	0.83065	3	4	1
17	17.93939	50.00000	0.33463	0.07690	0.83213	0.33517	0.07419	0.83065	4	2	1
18	18.00000	50.00000	0.33517	0.07701	0.83065	0.33517	0.07798	0.83065	4	3	1

Tabla 3.3 Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de acero 1020

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	15.73006	30.00002	0.28238	0.07754	0.95778	0.26815	0.07419	0.94355	1	2	3
2	14.00001	30.16600	0.26842	0.07445	0.99940	0.26815	0.07419	1.00000	1	2	4
3	17.46013	30.00005	0.29660	0.08075	0.91555	0.26815	0.07798	0.88710	1	3	2
4	14.00000	30.00002	0.26815	0.07449	1.00000	0.26815	0.07798	1.00000	1	3	4
5	17.46008	30.00035	0.29660	0.08075	0.91555	0.26815	0.08178	0.88710	1	4	2
6	15.73006	30.00001	0.28238	0.07754	0.95778	0.26815	0.08178	0.94355	1	4	3
7	14.17331	44.15336	0.29196	0.07185	0.94501	0.29049	0.07039	0.94355	2	1	3
8	14.00000	44.85267	0.29153	0.07143	0.94674	0.29049	0.07039	1.00000	2	1	4
9	15.58350	49.99965	0.31363	0.07293	0.88963	0.31283	0.07039	0.88710	3	1	2
10	14.00006	49.99982	0.29951	0.07039	0.92828	0.31283	0.07039	1.00000	3	1	4
11	15.58304	49.99991	0.31362	0.07293	0.88964	0.33517	0.07039	0.88710	4	1	2
12	14.00003	49.99096	0.29949	0.07039	0.92831	0.33517	0.07039	0.94355	4	1	3
13	17.99998	41.52881	0.32087	0.07900	0.86103	0.29049	0.07798	0.83065	2	3	1
14	17.99998	41.52881	0.32087	0.07900	0.86103	0.29049	0.08178	0.83065	2	4	1
15	17.99989	45.75976	0.32804	0.07800	0.84586	0.31283	0.07419	0.83065	3	2	1
16	17.99986	45.76007	0.32804	0.07800	0.84586	0.31283	0.08178	0.83065	3	4	1
17	17.89230	49.99939	0.33421	0.07682	0.83328	0.33517	0.07419	0.83065	4	2	1
18	17.99999	49.99987	0.33517	0.07701	0.83065	0.33517	0.07798	0.83065	4	3	1

Tabla 3.4 Resultados del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de cobre 2.0090 (Cu DHP) para deformación en frío (Procedimiento figura 3.4)

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	15.27803	18.18182	0.27836	0.07382	0.95005	0.26171	0.07107	0.93391	1	2	3
2	13.35000	18.00000	0.26171	0.07055	1.00000	0.26171	0.07107	1.00000	1	2	4
3	17.28318	18.00000	0.29467	0.07756	0.90032	0.26171	0.07533	0.86781	1	3	2
4	13.50424	18.00000	0.26300	0.07081	0.99609	0.26171	0.07533	1.00000	1	3	4
5	17.28318	18.00000	0.29467	0.07756	0.90032	0.26171	0.07960	0.86781	1	4	2
6	15.27803	18.18182	0.27836	0.07382	0.95005	0.26171	0.07960	0.93391	1	4	3
7	13.81273	26.90909	0.28867	0.06849	0.93515	0.28707	0.06681	0.93391	2	1	3
8	13.35000	20.90909	0.26923	0.06963	0.98265	0.28707	0.06681	1.00000	2	1	4
9	15.66364	30.00000	0.31337	0.07048	0.86980	0.31242	0.06681	0.86781	3	1	2
10	13.42712	23.63636	0.27689	0.06890	0.96443	0.31242	0.06681	1.00000	3	1	4
11	16.43485	30.00000	0.32037	0.07176	0.85026	0.33777	0.06681	0.86781	4	1	2
12	14.50682	30.00000	0.30285	0.06862	0.89912	0.33777	0.06681	0.93391	4	1	3
13	18.36288	24.18182	0.32149	0.07724	0.83609	0.28707	0.07533	0.80172	2	3	1
14	18.36288	24.18182	0.32149	0.07724	0.83609	0.28707	0.07960	0.80172	2	4	1
15	18.44000	26.72727	0.32939	0.07642	0.81896	0.31242	0.07107	0.80172	3	2	1
16	18.44000	26.72727	0.32939	0.07642	0.81896	0.31242	0.07960	0.80172	3	4	1
17	18.20864	30.00000	0.33649	0.07479	0.80530	0.33777	0.07107	0.80172	4	2	1
18	18.44000	29.63636	0.33757	0.07533	0.80161	0.33777	0.07533	0.80172	4	3	1

Tabla 3.5 Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de cobre 2.0090 (Cu DHP) para deformación en frío

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	f_tO	f_pO	f_wO	f_td	f_pd	f_wd	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	15.30981	18.00019	0.27813	0.07394	0.95033	0.26171	0.07107	0.93391	1	2	3
2	13.35000	18.00001	0.26171	0.07055	1.00000	0.26171	0.07107	1.00000	1	2	4
3	17.26976	18.00003	0.29456	0.07753	0.90066	0.26171	0.07533	0.86781	1	3	2
4	13.35000	18.00006	0.26171	0.07055	1.00000	0.26171	0.07533	1.00000	1	3	4
5	17.26977	18.00003	0.29456	0.07753	0.90066	0.26171	0.07960	0.86781	1	4	2
6	15.30985	18.00003	0.27813	0.07394	0.95033	0.26171	0.07960	0.93391	1	4	3
7	13.76376	27.06341	0.28863	0.06836	0.93547	0.28707	0.06681	0.93391	2	1	3
8	13.35001	28.13292	0.28764	0.06738	0.93957	0.28707	0.06681	1.00000	2	1	4
9	15.60120	30.00000	0.31280	0.07038	0.87139	0.31242	0.06681	0.86781	3	1	2
10	13.35001	29.99982	0.29234	0.06681	0.92844	0.31242	0.06681	1.00000	3	1	4
11	15.60119	29.99998	0.31280	0.07038	0.87139	0.33777	0.06681	0.86781	4	1	2
12	13.35001	29.99838	0.29234	0.06681	0.92845	0.33777	0.06681	0.93391	4	1	3
13	18.44000	23.87747	0.32130	0.07750	0.83595	0.28707	0.07533	0.80172	2	3	1
14	18.44000	23.87747	0.32130	0.07750	0.83595	0.28707	0.07960	0.80172	2	4	1
15	18.43994	26.75793	0.32947	0.07641	0.81878	0.31242	0.07107	0.80172	3	2	1
16	18.43974	26.75879	0.32948	0.07641	0.81878	0.31242	0.07960	0.80172	3	4	1
17	18.20403	29.99935	0.33645	0.07478	0.80542	0.33777	0.07107	0.80172	4	2	1
18	18.40755	29.77385	0.33767	0.07522	0.80161	0.33777	0.07533	0.80172	4	3	1

Tabla 3.6 Resultados del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de aluminio 3.0517 (EN-AW 3003) (Procedimiento figura 3.4)

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	f_tO	f_pO	f_wO	f_td	f_pd	f_wd	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	27.28485	30.00000	0.27739	0.07332	0.94893	0.26056	0.07047	0.93295	1	2	3
2	23.70000	30.00000	0.26056	0.06987	1.00000	0.26056	0.07047	1.00000	1	2	4
3	30.73182	30.30303	0.29408	0.07677	0.89875	0.26056	0.07476	0.86590	1	3	2
4	23.97576	30.00000	0.26185	0.07013	0.99607	0.26056	0.07476	1.00000	1	3	4
5	30.73182	30.30303	0.29408	0.07677	0.89875	0.26056	0.07904	0.86590	1	4	2
6	27.28485	30.00000	0.27739	0.07332	0.94893	0.26056	0.07904	0.93295	1	4	3
7	24.52727	45.15152	0.28789	0.06780	0.93403	0.28617	0.06619	0.93295	2	1	3
8	23.70000	34.84848	0.26804	0.06897	0.98266	0.28617	0.06619	1.00000	2	1	4
9	27.83636	50.00000	0.31212	0.06985	0.86955	0.31178	0.06619	0.86590	3	1	2
10	23.70000	40.00000	0.27593	0.06802	0.96424	0.31178	0.06619	1.00000	3	1	4
11	29.49091	49.39394	0.31956	0.07150	0.84815	0.33738	0.06619	0.86590	4	1	2
12	25.90606	49.69697	0.30182	0.06817	0.89813	0.33738	0.06619	0.93295	4	1	3
13	32.80000	40.30303	0.32102	0.07669	0.83352	0.28617	0.07476	0.79884	2	3	1
14	32.80000	40.30303	0.32102	0.07669	0.83352	0.28617	0.07904	0.79884	2	4	1
15	32.80000	45.15152	0.32924	0.07561	0.81618	0.31178	0.07047	0.79884	3	2	1
16	32.80000	45.15152	0.32924	0.07561	0.81618	0.31178	0.07904	0.79884	3	4	1
17	32.52424	50.00000	0.33598	0.07427	0.80277	0.33738	0.07047	0.79884	4	2	1
18	32.80000	50.00000	0.33738	0.07454	0.79884	0.33738	0.07476	0.79884	4	3	1

Tabla 3.7 Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de aluminio 3.0517 (EN-AW 3003)

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	27.24021	30.00006	0.27718	0.07328	0.94957	0.26056	0.07047	0.93295	1	2	3
2	23.70003	30.00004	0.26056	0.06987	1.00000	0.26056	0.07047	1.00000	1	2	4
3	30.78045	30.00000	0.29380	0.07689	0.89914	0.26056	0.07476	0.86590	1	3	2
4	23.70001	30.00003	0.26056	0.06987	1.00000	0.26056	0.07476	1.00000	1	3	4
5	30.78045	30.00000	0.29380	0.07689	0.89914	0.26056	0.07904	0.86590	1	4	2
6	27.23977	30.00188	0.27718	0.07328	0.94957	0.26056	0.07904	0.93295	1	4	3
7	24.48024	45.20381	0.28773	0.06775	0.93451	0.28617	0.06619	0.93295	2	1	3
8	23.70007	47.09802	0.28669	0.06672	0.93885	0.28617	0.06619	1.00000	2	1	4
9	27.83641	49.99999	0.31212	0.06985	0.86955	0.31178	0.06619	0.86590	3	1	2
10	23.70002	49.99967	0.29106	0.06619	0.92848	0.31178	0.06619	1.00000	3	1	4
11	27.83645	49.99991	0.31212	0.06985	0.86955	0.33738	0.06619	0.86590	4	1	2
12	23.70006	49.99852	0.29106	0.06619	0.92848	0.33738	0.06619	0.93295	4	1	3
13	32.79998	40.27078	0.32096	0.07670	0.83364	0.28617	0.07476	0.79884	2	3	1
14	32.79998	40.27078	0.32096	0.07670	0.83364	0.28617	0.07904	0.79884	2	4	1
15	32.80000	45.12816	0.32920	0.07561	0.81627	0.31178	0.07047	0.79884	3	2	1
16	32.79999	45.12819	0.32920	0.07561	0.81627	0.31178	0.07904	0.79884	3	4	1
17	32.53343	49.99950	0.33603	0.07428	0.80264	0.33738	0.07047	0.79884	4	2	1
18	32.79998	49.99999	0.33738	0.07454	0.79885	0.33738	0.07476	0.79884	4	3	1

Tabla 3.8 Resultados del Modelo de Optimización Matemática por el método de Chevichev para el tubo de acero inoxidable al cromo (Procedimiento figura 3.4)

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	14.64879	15.00000	0.27927	0.07296	0.94828	0.26240	0.07008	0.93200	1	2	3
2	12.75000	15.00000	0.26240	0.06951	1.00000	0.26240	0.07008	1.00000	1	2	4
3	16.47455	15.15152	0.29601	0.07640	0.89743	0.26240	0.07435	0.86400	1	3	2
4	12.89606	15.00000	0.26370	0.06977	0.99602	0.26240	0.07435	1.00000	1	3	4
5	16.47455	15.15152	0.29601	0.07640	0.89743	0.26240	0.07862	0.86400	1	4	2
6	14.64879	15.00000	0.27927	0.07296	0.94828	0.26240	0.07862	0.93200	1	4	3
7	13.18818	22.42424	0.28965	0.06747	0.93368	0.28816	0.06580	0.93200	2	1	3
8	12.75000	17.42424	0.27001	0.06860	0.98224	0.28816	0.06580	1.00000	2	1	4
9	14.94091	25.00000	0.31452	0.06945	0.86707	0.31391	0.06580	0.86400	3	1	2
10	12.75000	19.84848	0.27756	0.06770	0.96448	0.31391	0.06580	1.00000	3	1	4
11	15.74424	24.84848	0.32177	0.07090	0.84630	0.33967	0.06580	0.86400	4	1	2
12	13.84545	25.00000	0.30396	0.06760	0.89691	0.33967	0.06580	0.93200	4	1	3
13	17.57000	20.15152	0.32324	0.07629	0.83097	0.28816	0.07435	0.79600	2	3	1
14	17.57000	20.15152	0.32324	0.07629	0.83097	0.28816	0.07862	0.79600	2	4	1
15	17.57000	22.57576	0.33159	0.07520	0.81321	0.31391	0.07008	0.79600	3	2	1
16	17.57000	22.57576	0.33159	0.07520	0.81321	0.31391	0.07862	0.79600	3	4	1
17	17.42394	25.00000	0.33846	0.07385	0.79943	0.33967	0.07008	0.79600	4	2	1
18	17.57000	25.00000	0.33986	0.07412	0.79545	0.33967	0.07435	0.79600	4	3	1

Tabla 3.9 Verificación del resultado del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev del software MATHEMATICAL para el tubo de acero inoxidable al cromo

<i>id</i>	P_i	σ_{xf}	$f_t O$	$f_p O$	$f_w O$	$f_t d$	$f_p d$	$f_w d$	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
1	14.63252	15.00001	0.27912	0.07293	0.94872	0.26240	0.07008	0.93200	1	2	3
2	12.75002	15.00001	0.26240	0.06951	1.00000	0.26240	0.07008	1.00000	1	2	4
3	16.51504	15.00001	0.29584	0.07654	0.89744	0.26240	0.07435	0.86400	1	3	2
4	12.75004	15.00034	0.26240	0.06951	1.00000	0.26240	0.07435	1.00000	1	3	4
5	16.51504	15.00001	0.29584	0.07654	0.89744	0.26240	0.07862	0.86400	1	4	2
6	14.63252	15.00002	0.27912	0.07293	0.94872	0.26240	0.07862	0.93200	1	4	3
7	13.16338	22.52927	0.28975	0.06739	0.93359	0.28816	0.06580	0.93200	2	1	3
8	12.75006	23.46758	0.28872	0.06636	0.93797	0.28816	0.06580	1.00000	2	1	4
9	14.92120	24.99997	0.31433	0.06941	0.86761	0.31391	0.06580	0.86400	3	1	2
10	12.75000	24.99995	0.29340	0.06580	0.92675	0.31391	0.06580	1.00000	3	1	4
11	14.92117	24.99995	0.31433	0.06941	0.86761	0.33967	0.06580	0.86400	4	1	2
12	12.75000	24.99987	0.29340	0.06580	0.92675	0.33967	0.06580	0.93200	4	1	3
13	17.56999	20.14156	0.32320	0.07630	0.83104	0.28816	0.07435	0.79600	2	3	1
14	17.56999	20.14155	0.32320	0.07630	0.83104	0.28816	0.07862	0.79600	2	4	1
15	17.56998	22.53288	0.33144	0.07522	0.81352	0.31391	0.07008	0.79600	3	2	1
16	17.56998	22.53287	0.33144	0.07522	0.81353	0.31391	0.07862	0.79600	3	4	1
17	17.41292	24.99905	0.33835	0.07383	0.79974	0.33967	0.07008	0.79600	4	2	1
18	17.56985	24.93186	0.33963	0.07415	0.79596	0.33967	0.07435	0.79600	4	3	1

Conclusiones del capítulo III:

1. El objetivo de este trabajo es proporcionar modelo de optimización para el proceso de doblado de tubos por el método de arrastre con la intención de buscar un compromiso razonable entre las funciones del adelgazamiento, el aplanamiento y las arrugas en la pared del tubo. La principal contribución consiste en que proporciona los valores de la presión interna y la carga axial correspondientes a las funciones óptimas por este método.
2. Como se aprecia en las figuras (3.1), (3.2), y (3.3), la magnitud de la carga axial tiene una gran influencia en la minimización y maximización de las funciones objetivo.
3. Como se aprecia en las figuras (3.1), (3.2), y (3.3), la magnitud de la presión interna tiene una gran influencia en la minimización y maximización de las funciones objetivo.
4. El modelo de optimización matemática empleado, permite establecer la magnitud exacta

de los esfuerzos axiales y las presiones internas que satisfagan los valores óptimos de las funciones objetivos según el rango de prioridad establecido para cada una de ellas.

5. La diferencia de valores de los resultados de las corridas del algoritmo utilizado respecto al implementado por el método de Tchebycheff en el MATHEMATICAL, son insignificantes.
6. La utilización de este conocimiento permite la mejora de la calidad de los productos terminados mediante el establecimiento de las cargas para cada caso específico y, por lo tanto, la posibilidad del cálculo de las longitudes de los tubos iniciales y topes longitudinales y con precisión y todo esto puede repercutir en un ahorro de tiempo y costo en la producción al poder evitar el desarrollo de los prototipos por ensayo y error además de obtenerse una mejor calidad del producto terminado.

CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El estudio realizado facilita las ecuaciones necesarias para evaluar el adelgazamiento, aplanamiento y formación de arrugas en la pared del tubo en el proceso de doblado por el método de arrastre, dependientemente de la variación de la carga axial y la presión interna en el tubo en el proceso de doblado; se establecen los límites inferior y superior para esas cargas; se establecen además la relación entre la magnitud de la presión interna y la holgura entre el mandril y el diámetro interno del tubo. Finalmente se establece un modelo de optimización multiobjetivo capaz de hallar un compromiso razonable entre los indicadores formalizables de eficiencia.

Recomendaciones

Se recomienda a futuros investigadores realizar trabajos análogos a este para otros métodos de doblado de tubos, también se recomienda realizar trabajos de optimización multiobjetivo relacionados con la geometría de las herramientas en el método de doblado de tubos por arrastre.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 **Knauth, P.** El descubrimiento de los metales. *Time-Life International, Brepols Fabrieken, N. V Holanda*, 1975.
- 2 **Industrias, N.** Producción mundial de acero crece 7% en marzo. *America Económica* (2011).
- 3 **Informe21.com.** Producción de Siderúrgica del Orinoco (2011).
- 4 **CVG.** Alianza con China aumentará producción de hierro en Venezuela *Notidiario Tucupita*, (2011).
- 5 **Moore, H.D.** *Materiales y Procesos de Fabricación*. Mexico, (2002).
- 6 **Vago, E.R.d.** Aluminio. *Star Media*, 2011.
- 7 **Cruz, R.L.** Sector Aluminio de Venezuela. (2005).
- 8 **PDVSA.** Museo Geológico Virtual de Venezuela. Caracas, (2011).
- 9 **Ltd., I.C.A.** Tubos de Cobre. (Copper Connet Life, Chile, Santiago, (2011).
- 10 **García María, Tesis Doctoral,** . Contribución al Proceso De Doblado De La Chapa. (Universitat de Girona, España., Girona, 2005).

- 11 Wenchuan, L. and Lawrence, Y.Y.** Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING.*, 2001, **Vol. 123**, 8.
- 12 Sukthomya, W. and Tannock, J.** The optimisation of neural network parameters using Taguchi's design of experiments approach: an application in manufacturing process modelling. *Neural Comput & Applic*, 2005, **4**, 1337–1344.
- 13 Strano, M.** Automatic tooling design for rotary draw bending of tubes. *International Journal of Advantages of Manufacturing Technologies*, 2005, **26**, 733–740.
- 14 Lou, H. and Stelson, K.A.** Three-Dimensional Tube Geometry Control for Rotary Draw Tube Bending, Part 2: Statistical Tube Tolerance Analysis and Adaptive Bend Correction. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING.*, 2001, **Vol. 123**, 266-271.
- 15 Lou, H. and Stelson, K.A.** Three-Dimensional Tube Geometry Control for Rotary Draw Tube Bending, Part 1: Bend Angle and Overall Tube Geometry Control. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING*, 2001, **Vol. 123**, , 258-265.
- 16 Hsu, Y.-L., Liu, T.-C., Thibault, F. and Lanctot, B.** Design optimization of the blow moulding process using a fuzzy optimization algorithm Y-L. *J. Engineering Manufacture*, 2003, 17.
- 17 Critchley, K.L. and Blount, G.N.** Process analysis software for the prediction of elongation with respect to the draw bending of small diameter thin walled tubing. *Journal of Materials Processing Technology* 2005, **167**, 41-46.
- 18 Al-Qureshi, H.A.** Elastic-plastic analysis of tube bending *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, **39**(1), Pages 87-104

- 19 **Al-Qureshi, H.A. and Russo, A.** Spring back and residual stresses in bending of thin-walled aluminium tubes. *Materials & Design*, 2002, **Volume 23**(Issue 2), Pages 217-222.
- 20 **Elchalakani, M., Zhao, X.L. and Grzebieta, R.H.** Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending *International Journal of Mechanical Sciences*, 2002, **44**(6), 1117-1143.
- 21 **George, W.** Hines Bending Systems. . US & Canada, 2008).
- 22 **Tang, N.C.** Plastic-deformation analysis in tube bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000, 6.
- 23 **Wang, X. and Cao, J.** Wrinkling Analysis in Shrink Flanging. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING.*, 2001, **Vol. 123**, , 7.
- 24 **Yang, H. and Lin, Y.** Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **152** 363-369.
- 25 **López, J.L.** *Métodos e hipótesis científicas*. México, 1984).
- 26 **Navarro, M.** Conferencia sobre la Metodología de la Investigación Experimental CE CAD/CAM Utto. . Cuba, 2005).
- 27 **Navarro, M.** Monografía (Parte 1ª y 1b). sobre M.I.E.. Diseño de la investigación CE CAD/CAM Utto. . Cuba, 2007).
- 28 **Sampieri, R.H., Collado, C.F. and Lucio, P.B.** *Metodología de la investigación*. (Mc Graw Hill, Colombia 1996).
- 29 **Mallo, M.G.** *Conformación De Metales*. (Editorial Pueblo Y Educación, La Habana, Cuba, 1983).

- 30 **De-Garmo, E.P., J. T. Black, R.A. and Kohser.** *Material and Processes in Manufacturing*. 2002).
- 31 **Elenev, S.A.** *Estampado en Frío*. (Editorial Mir, Moscu, URSS. , 1981).
- 32 **KALPAKJIAN, S. and SCHMID, S.** *"Manufactura, ingeniería y Tecnología"*. (Prentice Hall, México,, 2002).
- 33 **PAQUIN, J.J.** *"Diseño de matrices"*. (Montaner y Simón 5 A, Barcelona 1979).
- 34 **Schey, J.** *"Procesos de Manufactura"*,. (Mc Graw Hill, México, 2001).
- 35 **Bardelcik, A. and Worswick, M.J.** The Effect of Element Formulation on the Prediction of Boost Effects in Numerical Tube Bending. *American Institute of Physics*, 2005, 8.
- 36 **Chunfeng, L., Y, Y., G, G., X., W. and L., J.** Research on the section distortion of hat-section profiles in rotary draw bending with stretching force. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, **94**(1), 4.
- 37 **Hurtado, J. and Santana, R.** Relación entre los parámetros de carga y geométricos y los defectos que ocurren en el proceso de doblado de tubos por arrastre. In COMEC, ed. *VI CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA* Santa Clara, Cuba, 2010).
- 38 **Hurtado, J.L., Moya, J. and Cárdenas, J.** "INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE CARGA EN LOS DEFECTOS QUE OCURREN EN EL PROCESO DE DOBLADO DE TUBOS POR ARRASTRE". *Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 2011, **34**, (2).
- 39 **Hurtado, J.L. and Santana, R.** OPTIMIZACION DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LOS PROCESOS DE DOBLADOS DE TUBOS NORMALIZADOS

DE ACERO DE BAJO CARBONO. In Arquitectura, C.C.d.I.y., ed. *V Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica y Metalurgia* La Habana, Cuba, 2008).

40 Hurtado, J.L. and Santana, R. Relación Entre Los Parámetros de Carga y Geométricos y los Defectos que ocurren en el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre. In Arquitectura, X.C.C.d.I.y., ed. *VI Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería* La Habana, Cuba, 2010).

41 Hurtado, J.L., Santana, R. and Soroa, S.P. Análisis de la Deformación Plástica en el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre. In Holguín, U.d., ed. *V CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL* Holguín, Cuba, 2011).

42 Jin, Z., Luo, S. and Fang, X.D. KBS-aided design of tube bending processes, . *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2001, **14**, 599-606.

43 Wang, J. and Agarwal, R. Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2006, **Volume 128**. (Issue 2,), 8 pages.

44 Agarwal, R. TUBE BENDING WITH AXIAL PULL AND INTERNAL PRESSURE. *Mechanical Engineering*, p. 104 (Bangalore University, India, Bangalore 2004).

45 Abdel-Nasser, Y.A., Masaoka, K. and Okada, H. Ultimate strength of dented tubular members subjected to compression and bending. *Alexandria Engineering Journal*, , 2006, **Vol. 45 (2006)**(No. 1), 37-46.

- 46 **Ceclan, V.A., Achimas, G., Lazarescu, L. and Groze, F.** Influence of the internal pressure on the change of the wall thickness in the case of tubes subjected to bending. *Annals of DAAAM & Proceedings, Annual*, , 2007.
- 47 **Song, J.-H., Huh, H., Kim, S.-H. and Park, S.-H.** Springback Reduction in Stamping of Front Side Member with a Response Surface Method. *American Institute of Physics*, 2005, 7.
- 48 **Naceur, H., Ben-Elechi, S., Knopf-Lenoir, C. and Batoz, J.L.** Response Surface Methodology for the Design of Sheet Metal Forming Parameters to Control Springback Effects using the Inverse Approach. *American Institute of Physics*, 2004, 7.
- 49 **Lepadatu, D., Kobi, A., Baguenard, X. and Jaulin³, L.** Springback of Stamping Process Optimization Using Response Surface Methodology and Interval Computation. *Quality Technology & Quantitative Management*, 2009, **Vol. 6**, pp. 409-421.
- 50 **Lepadatu, D., Hambli, R., Kobi, A. and Barreau, A.** Optimisation of springback in bending processes using FEM simulation and response surface method *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, **Volume 27**(Numbers 1-2), 40-47.
- 51 **García, M.** Contribución al Proceso De Doblado De La Chapa. (Universitat de Girona, España., Girona, 2005).
- 52 **Chatti, S., Hermes, M., Weinrich, A., Ben-Khalifa, N. and Tekkaya, A.E.** NEW INCREMENTAL METHODS FOR SPRINGBACK COMPENSATION BY STRESS SUPERPOSITION. *Int J Mater Form*, 2009, **2** (1), 817-820.
- 53 **Achimaş, G. and Lăzărescu, L.** EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ABOUT INFLUENCES ON SPRINGBACK OF BENT TUBES. *Computing and Solutions in Manufacturing Engineering*, 2004, 111.

- 54 **Gu, R.J., Yang, H., Zhan, M., Li, H. and Li, H.W.** Research on the springback of thin-walled tube NC bending based on the numerical simulation of the whole process. *Computational Materials Science* 2008, **42**, 537-549.
- 55 **Batoz, J.L., H. Naceur and Guo3, Y.Q.** Formability Predictions in Stamping and Process Parameter Optimization Based on the Inverse Approach Code Fast_Stamp *American Institute of Physics*, 2005, 7.
- 56 **Tracto-Technik.** Automated Fabrication of Template Pipes. 2009).
- 57 **Zang, L.C. and Yu, T.X.** “An Investigation of the Brazier Effect on a Cylindrical Tube Under Pure Elastic-Plastic Bending,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1987.
- 58 **Jin, Z., Luob, S. and Fang, X.D.** KBS-aided design of tube bending processes *Artificial Intelligence*, 2002, **Volume 14**(Issue 5), 8.
- 59 **Bourgeta, J.-P., Fafardb, M., Shakeric, H.R. and Côtéd, T.** Optimization of heat treatment in cold-drawn 6063 aluminium tubes *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **Volume 209**(Issue 11), Pages 5035-5041
- 60 **Wang, X. and J. Cao.** An analytical model for flange wrinkling in sheet metal forming. *Journal of Manufacturing Processes* 2000, 100-107.
- 61 **Wang, X. and Cao, J.** Wrinkling Limit in Tube Bending. *JOURNAL OF ENGINEERING MATERIALS AND TECHNOLOGY*, 2001, 6.
- 62 **Chen, S.K., Mangiameli, P. and Roethlein, C.** Predicting the Output of a Tube-bending Process: A Case Study. 2003.

- 63** **Chen, W., Wierzbicki, T. and Santosa, S.** Bending collapse of thin-walled beams with ultralight filler: numerical simulation and weight optimization. *Acta Mechanica*, 2000, **Volume 153**(Numbers 3-4), 183-206.
- 64** **Cheng, L. and YANG, H.** Effects of process parameters on numerical control bending process for large diameter thin-walled aluminum alloy tubes *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, **Volume 19**(Issue 3), Pages 668-673.
- 65** **Gang-yao, Z., Yu-li, L., He, Y. and Cai-hong, L.** Cross-sectional distortion behaviors of thin-walled rectangular tube in rotary-draw bending process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, **20**, 484-489.
- 66** **Goodarzi, M., Kuboki, T. and Murata, M.** Effect of die corner radius on the formability and dimensional accuracy of tube shear bending. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, **35**, 66-74.
- 67** **Goodarzi, M., Kuboki, T. and Murata, M.** Deformation analysis for the shear bending process of circular tubes. *Journal of Materials Processing Technology* 2005, **Volumes 162-163**, 492-497.
- 68** **Okui, T., Kuroda, K. and Akiyama, M.** Suppression of Bending Phenomenon of Steel Tube in Diameter Reduction by Cold Press *Journal of Engineering Manufacture*, 2006, **Volume 220**(Number 5), 627-635.
- 69** **Orban, H., Lin, G. and Hu, S.J.** WRINKLING DETECTION IN TUBE BENDING SIMULATIONS. *Transactions of NAMRI/SME*, 2007, **Volume 35**, .
- 70** **Poonaya, S., Thinvongpituk, C. and Teeboonma, U.** An Analysis of Collapse Mechanism of Thin- Walled Circular Tubes Subjected to Bending. *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering* 2007, 6.

- 71 Hurtado, J.L., Santana, R. and Soroa, S.P.** Análisis de la Deformación Plástica el el Proceso de Doblado de Tubos por Arrastre. In Holguín, U.d., ed. *V CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL* Holguín, Cuba, 2010).
- 72 Wang, X. and Cao, J.** On the prediction of side-wall wrinkling in sheet metal forming processes. *International Journal of Mechanical Sciences* 2000, **42**, 2369-2394.
- 73 Spath, D., Neithardt, W. and Bangert2, C.** Optimized design with topology and shape optimization. *J Engineering Manufacture*, 2002, **Vol 216**, 6.
- 74 Stachowicz, F.** Bending with upsetting of copper tube elbows *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, **Volume 100**, (Issues 1-3), Pages 236-240
- 75 Tang, D., Li, D., Yin, Z. and Peng, Y.** Roles of Surface Booster System on Bending of Thin-Walled Copper Tube. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, **18**(Number 4), 369-377.
- 76 Rossi, M.** *Estampado En Frío De La Chapa*. (Dossat S.A, 9na Edición, Barcelona, 1979).
- 77 Achimas, G., L., C. and S., L., L.** Quality Assurance of the Bent tubes Using finite Element Simulation,. *3-rd INTERNATIONAL CONGRESS ON PRECISITION MACHINING (ICPM)*. , pp. 43-48Austria, Viena, 2005).
- 78 Ceclan, V.A., Achimaş, G., Lăzărescu, L. and Groze, F.M.** FINITE ELEMENT SIMULATION OF TUBES PRESS BENDING PROCESS
7th INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE Baia Mare, Romania,, 2007).
- 79 TTB, P.b.b.** Pipe Bending Methods. Oklahoma, 2004).
- 80 Omni-X.** OMNI-X Tube Bending Guide. (Guide, Colorado USA, Praga, 2009).

- 81 **Nock, M.** Simulative Optimization Of The Rubber Pad Bending Technology For Tubes. *American Institute of Physics*, 2004, 1095-1100.
- 82 **Zhang, Y. and Redekop, D.** Shell element simulation of the push method of tube bending. *journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2006, 4.
- 83 **Gantner, P., Bauer, H., Harrison, D.K. and Silva, A.K.M.D.** FEA Simulation of Bending Processes With LS-DYNA. *8th International Users Conference* 2004).
- 84 **Gantner, P., Bauera, H., Harrison, D.K. and Silva, A.K.M.D.** Free-Bending, A new bending technique in the hydroforming process chain. *Journal of Materials Processing Technology* 2005, **Volume 167**(ssues 2-3), Pages 302-308.
- 85 **Mahanty, D.K. and Balan, N.M.** Simulating Rotary Draw Bending and Tube Hydroforming. *Engineering Services Group, Tata Consultancy Services* 2002).
- 86 **ThomasNetIndustrialNews.** Rotary Draw Bending Machines bend solid round bar stock. 2010).
- 87 **Zhao, G., Liu, Y. and Yang, H.** Effect of clearance on wrinkling of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, **Volume 50** (Numbers 1-4,), 85-92.
- 88 **Dong, Y., Yang, Y.Y. and Zhao, L.H.** Research on the relationship between the number of rotary draw bendings and the shape precision of a bent hat-section profile. *Journal of Materials Processing Technology* 2004, **151**, 307-311.
- 89 **Lăzărescu, L., achimaș, G., Ognean, D. and Groze, F.** PREDICTION OF QUALITY PARAMETERS IN THE TUBE BENDING PROCESS USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. *Publicat de*

Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", Iași

CONSTRUCȚII DE MAȘINI, 2005, **LI**(5).

90 Lazarescu, L., Achimas, G. and Ogneanu, D., Groze, F. Studies on wall thickness change of bent tubes using Finite Element Simulation International *Conference Modern technologies*, pp. P.527-534(2006).

91 Lazarescu, L., Gh..Achimas, S.Grozav and Groze, F. Finite Element Simulation of Rotary Draw Tube Bending Process MTeM. *Journal of Manufacturing Engineering*, 2005, 263-266.

92 Mentella, A., Strano, M. and Skrikerud, M. MULTI-MATERIAL FEM APPROACH FOR THE PREDICTION OF THE BEHAVIOR OF DRAW-BENDED TUBULAR PROFILES. *International Journal of Material Form*, 2010, **3** (1), 93 - 96.

93 Leea, H. and Tyneb, C.J.V. Finite element bending analysis of oval tubes using rotary draw bender for hydroforming applications. *Journal of Materials Processing Technology* 2005, **Volume 168**(Issue 2), Pages 327-335.

94 Lazarescu., Achimas, L., Grozav, G. and S. Groze, F. Finite Element Simulation of Rotary Draw Tube Bending Process MTeM. *Journal of Manufacturing Engineering*, 2005, 263-266.

95 Yang, J.-b., Jeon, B.-h. and Oh, S.-I. The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **111**(1-3), 175-181.

96 CML USA, I. Manufacturer of Tube, Pipe & Profile Bending Machinery. 2010).

- 97 **Advanced Fabricating Machinery, I.** Tube Bending Machines from SOCO, INECO, TRANSFLUID, AMI, STIERLI and now COMAC. 2010).
- 98 **Criterion Machinery, I.** Standard Tube Bending Machines. 2010).
- 99 **EAGLE.** CNC TUBE BENDERS. 2010.
- 100 **Ever-RollSpecialties.Co.** Tube, Rod & Wire Fabrication Specialists. 2010).
- 101 **HTM.** Horn Machine Tools, Inc. 2010).
- 102 **JWKMachinerySales.Co.** Rotary Draw Benders, Pipe and Tube Benders. 2010).
- 103 **Pro-Tools.** Tube & Pipe Benders. 2010).
- 104 **Shuz Tung Machinery Industrial Co., L.** Pipe Bending Machine. 2010).
- 105 **Transformix-Engineering-Inc.** Tube Automotion Division. 2010).
- 106 **TrickTools.** Tube Benders. 2010).
- 107 **LS-DYNA.** LS-DYNA®, LS-OPT®, LS-PrePost®. 2009).
- 108 **Abedrabbo, N., Zafar, N., Averill, R., Pourboghraat, F. and Sidhu, R.** Optimization of a Tube Hydroforming Process. *American Institute of Physics*, 2004, 7.
- 109 **Kirby, D., Roy, S. and Kunju, R.** Optimization of tube hidroforming With Consideration of Manufacturing Effects On Structural Performance. *Materials & Design*, 2005, **Volume 778** 585-590.
- 110 **KBS.** Knowledge Management that Works. 2010).
- 111 **SIMULIA.** Abaqus FEA 2010).
- 112 **Red-Cedar-Technology.** HEEDS. 2010).
- 113 **Box, G.E.P. and Draper, N.** *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses.* 2007).

- 114 **Peña Sánchez de Rivera, D.** «Deducción de distribuciones: el método de Montecarlo», en *Fundamentos de Estadística*. (Alianza Editorial, Madrid, 2001).
- 115 **Goh, T.N.** Taguchi methods: some technical, cultural and pedagogical perspectives. *Quality and Reliability Engineering International*, 1993, **9**, 185-202.
- 116 **Li, B., Nye, T.J. and Metzger, D.R.** Multi-objective optimization of forming parameters for tube hydroforming process based on the Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol*, 2005, 23-30.
- 117 **HOPFIELD, J.J.** *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities*. (April Biophysics, USA, 1982).
- 118 **2020 Software Solutions, I.** Bend Tech EZ-3D. 2010).
- 119 **Forasassi, G. and Frano, R.L.** Curved thin shell buckling behaviour. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, **23**(2), 55-58.
- 120 **MSCSoftware.** MSC.Software Introduces Adams Gear Advanced Technology Solution 2010).
- 121 **UBIFRANCE.** ESI Group launches PAM-TUBE 2G for stamping simulation Paris, 2006).
- 122 **Ruiz, J.A.** *SISTEMAS DE INGENIERÍA* (Editorial Felix Varela, La Habana, 2000).
- 123 **S.Shamasundar, Mathai, M. and M, S.B.** COMPUTER MODELLING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF TUBE FORMING OPERATIONS. 1999.
- 124 **Kuboki, T., Makiyama, T. and Murata, M.** Thickness optimization of axisymmetric tube by three-dimensional finite-element analysis for high-flexural rigidity. *J. Mechanical Engineering Science*, 2006, 473-482.

- 125 **Strano, M.** Optimization under uncertainty of sheet-metalforming processes by the finite element method. *J. Engineering Manufacture*, 2006, 12.
- 126 **Xia, M., Takayanagi, H. and Kemmochi, K.** Optimal design of a thick-walled sandwich pipe. *Agency of Industrial Science and Technology*, 2000, **Vol. 9**(No. 4), 349-361.
- 127 **Di-Lorenzo, R., Filice, L., Umbrello, D. and Micari, F.** An integrated approach to the design of tube hydroforming processes: artificial intelligence, numerical analysis and experimental investigation. *American Institute of Physics*, 2004.
- 128 **Machado, A.** Consideraciones acerca del Diseño de los Engranajes Cilíndricos de Dientes Rectos, aplicables a su Recuperación. *Mecánica* (Universidad Central de las Villas, La Habana. Cuba, 2000).
- 129 **Evans, G.W.** An Overview of Techniques for Solving Multiobjective Mathematical Programs. *Management Science*, 1984, **30**(11).
- 130 **JACHATUROV, V.R.** *Métodos matemáticos de la programación regional.* (Nauka, Moscú, 1989.).
- 131 **Avila, R.** Generación de Tecnología para Máquinas Herramientas con Control Numérico Computarizado. *Mecánica* (Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín, 1999).
- 132 **Boizán, M.A.J.** *Optimización.* (Pueblo y Educación, La Habana, 1988).
- 133 **Cordovés, A. and Arzola, J.** Diseño optimo multiobjetivo y planificación del proceso de fabricación (CAD/CAPP) en redes de conductos de climatización. *Rev Ingeniería Mecánica*, 1999, **2**(1).

- 134 **Cordovés, A. and Arzola, J.** Diseño optimo multiobjetivo y prearación para la fabricación (CAD/CAPP) en redes de conductos de climatización. *Mecánica* (Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín, 1999).
- 135 **Deiros, B., Fernandez, E. and Diaz, T.** *Optimización*. (ISPJAE, La Habana, 1989).
- 136 **GARDINER, L.R., STEUER, R.E. and** Unified interactive múltiple objective programming. *Eur J. Opl Research*, 1994., **74**.
- 137 **KARAINOVA, J.N., NARULA, S.C. and VASSILEV:, V.** An interactive procedure for multi-objetive integer-programming prob/ems. *Eur. J. Opl Res.* , 1993., **68**
- 138 **SANTANA, R. and ARZOLA:, J.** Optimización multiobjetivo de procesos de forja en estampas de piezas rotacionalmente simétricas. *Proc. III Conferencia Internacional de Rebotica y Fábrica del Futuro* Pereira (Colombia), 1997.).
- 139 **SIMEÓN, R.** Diseño óptimo multiobjetivo de troqueles de corte y punzado simples y progresivos. (Universidad de Huguín "Oscar Lucero Moya", Holguín, , 1999.).
- 140 **STEUER, R.E.** *Múltiple criteria Optimization: Theory Computation and Application*. Willey, New York, 1986.).
- 141 **Bertsekas, D.P.** *Nonlinear Programming*. Boston, 1999).
- 142 **Hillier, F.S. and Lieberman, G.J.** *Investigación de operaciones* Mexico, 2001).
- 143 **BRONSON, R.** *INVESTIGACION DE OPERACIONES*. Mexico, 1986).
- 144 **Endelt, B., Nielsen, K.B. and Olsen, S.** Flexible Aluminum Tubes and a Least Square Multi-objective Non-linear Optimization Scheme. *American Institute of Physics*, 2004, 7.
- 145 **Endelt, B. and Nielsen, K.B.** Advanced Gradient Based Optimization Techniques Applied on Sheet Metal Forming.

. *American Institute of Physics*

2005, 7.

146 Grossmann, I.E. and Kravanja, Z. Mixed-integer nonlinear programming techniques for process systems engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 1995, **Volume 19**(1, 11), 189-204.

147 Grossmann, I.E. Mixed-Integer Nonlinear Programming Techniques for Process Systems Engineering. *Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA*, 1999.

148 Gupta, O.K. and Ravindran, A. Branch and Bound Experiments in Convex Nonlinear Integer Programming. *MANAGEMENT SCIENCE*, 1985, **Vol. 31**(12), 1533-1546.

149 Lee, Y. and Ellis, J.H. Comparison of Algorithms for Nonlinear Integer Optimization: Application to Monitoring Network Design. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, 524 - 529.

150 Narendra, P.M. and Fukunaga, K. A Branch and Bound Algorithm for Feature Subset Selection. *Computers, IEEE Transactions on* 2006, **26**(9).

151 Grimaldi, R.P. *Matemáticas Discreta y Combinatoria: Introducción y Aplicaciones*. (Pearson Educación, Mexico, 1998).

152 Vivek D. Pinto. A Survey Of Optimization Techniques Being Used In The Field <http://dimacs.rutgers.edu/~billp/pubs/SurveyOfOptimization.pdf>. 2001.

153 Tiwari, M.K. and Roy, D. Solving a part classification problem using simulated annealing-like hybrid algorithm *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2003, **Volume 19**(Issue 5), Pages 415-424

- 154 Suman, B. and Kumar, P.** A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization. *Journal of the Operational Research Society* 2006, **57**, 1143-1160.
- 155 Suman, B.** Study of simulated annealing based algorithms for multiobjective optimization of a constrained problem. *Computers and Chemical Engineering* 2004, **28** 1849-1871.
- 156 Eglese, R.W.** Simulated annealing: A tool for operational research *European Journal of Operational Research*, 2003, **Volume 46**(Issue 3), Pages 271-281.
- 157 Debudaj-Grabysz, A. and Czech, Z.J.** A Concurrent Implementation of Simulated Annealing and Its Application to the VRPTW Optimization Problem *Springer US*, 2005, **Volume 777**, 201-209.
- 158 Bandyopadhyay, Saha, S., Maulik, S. and U. Deb, K.** A Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm: AMOSA. 2008 **Volume: 12**(Issue: 3), 269 - 283.
- 159 Boudet, T., Chaton, P., Herault, L., Gonon, G., Jouanet, L. and Keller, P.** Thin Film Designs by Simulated Annealing. *Applied Optics*, 1996, **35**(31), 6219-6219-6222.
- 160 Belegundu, A. and E., C.** Minimizing Radiated Sound Power from Vibrating Shells - Theory and Experiment In ASME, ed. *Conference on Optimization in Industry* - pp. 7-10.1997).
- 161 Cederberg, R.J. and ., M.D.C.** Application of an Improved Self Starter to Geoacoustic Inversion. *IEEE Jour. Of Oceanic Engineering*; , 1997 . **22**, (1), 102 -109.

162 Salas, R. Redes Neuronales Artificiales

http://www.inf.utfsm.cl/~rsalas/Pagina_Investigacion/docs/Apuntes/Redes%20Neuronales%20Artificiales.pdf. Universidad de Valparaíso., 2003.

163 Belhadj, T., Abbassi, F., Mistou, S. and 1, A.Z. NUMERICAL ANALYSES OF TUBE HYDROFORMING PROBLEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS.

Int J Mater Form, 2010, **3** (1), 295 - 298.

164 Ko, T.J. and Cho, D.W. Adaptive Optimization of Face Milling Operations Using Neural Networks. *Jour. of Manufacturing Science and Eng.*, 1998, **120**, 443-451.

165 Lu, Y. and Markward, S.W. Development and Application of an Integrated neural System for an HDCL. *IEEE Trans. on Neural networks*, 1997, **6**.(6), 1328-1337.

166 Steeg, E.W. Neural Network Algorithms for RNA Secondary Structure Prediction. *Computer Science Dept.* (University of Toronto, Toronto 1989).

167 Takefuji, I., Chen, L.L., K.-C.Lee and Huffman, J. Parallel Algorithms for Finding a Near-maximum Independent Set of a Circle Graph. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1990, **1**(3), 263-267.

168 Yalcinoz, T. and M., J.S. Neural Networks Approach for Solving Economic Dispatch problem with Transmission Capacity Constraints. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1998, **13**(2), 307-313.

169 Veluswami, A., Nakhla, M.S. and Zhang, Q. The Application of Neural Networks to Em-based Simulation and Optimization of Interconnects in High Speed VLSI Circuits. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 1997, **45**(5).

- 170 Barán, B.** Colonia de Hormigas en un Ambiente Paralelo Asíncrono http://www.cnc.una.py/invest/paper2/ACS_CLEI_02.pdf. *Universidad Nacional de Asunción Centro Nacional de Computación*, 2002.
- 171 Bui, L.T., Whitacre, J. and Abbass, H.A.** Performance Analysis of Elitism in Multi-objective Ant Colony Optimization Algorithms. *The Artificial Life and Adaptive Robotics Laboratory*, 2008.
- 172 Gambardella, L.M.** Engineering complex systems: Ant Colony Optimization (and in general natural inspired metaheuristic) to model and to solve complex dynamic problems. *IDSIA, Istituto Dalle Molle di studi sull'Intelligenza Artificiale*, 2005.
- 173 Gardel, P., Barán, B., Estigarribia, H., Fernández, U. and Duarte, S.** Multiobjective Reactive Power Compensation with an Ant Colony Optimization Algorithm <http://www.google.com/#sclient=psy&hl=es&site=&source=hp&q=1%09Gardel>. *National University of Asuncion, Paraguay*, 2005.
- 174 Paciello, J.M., Martínez, H.D., Lezcano, C.G. and Barán, B.** Algoritmos de Optimización multi-objetivos basados en colonias de hormigas. *Universidad Nacional de Asunción, Facultad Politécnica*, 2006.
- 175 Ponce, J.C., Padilla, F., Padilla, A., Meza, M.A. and Ochoa, C.A.** ACHPM: ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN CON COLONIA DE HORMIGAS PARA EL PROBLEMA DE LA MOCHILA. *Departamento de Sistemas Electrónicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 2006.
- 176 Ghosh, A.** Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization: A Survey. *International Journal of Computing & Information Sciences*, 2004, **2**(1).

- 177 **Coello, C.A.C.** Introducción a la Optimización Evolutiva Multiobjetivo. *Depto. de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Universidad de Málaga*, 2002.
- 178 **Mezura-Montes, E. and Coello, C.A.C.** Conceptos de Optimización Multiobjetivo para el Manejo de Restricciones en Algoritmos Evolutivos: Un Estudio Comparativo. *CINVESTAV-IPN*, 2001, 1-8.
- 179 **Hollstein, R.B.** Artificial genetic adaptation in computer control systems. (University of Michigan, Michigan, 1971).
- 180 **Deb, K. and E., G.D.** mGA in C: A Messy Genetic Algorithm in C. IlliGAL Report 91008. *University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1991.
- 181 **Duponcheele, G. and Tilley, D.G.** Topological Optimization of a Bumper Beam via The Messy Genetic Algorithm. *Proc. of The Instn. Of Mech. Engrs.*, 1998., **212**, 133-143.
- 182 **Goldberg, D.E.** Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning. *Addison-Wesley Publishing Company Inc*, 1989.
- 183 **John, S., Mukhopadhyay, A. and Sikdar, S.** Optimisation of work roll shifting and bending to roll thinner gauge HR coils using genetic algorithm. *Maney on behalf of the Institute*, 2006, **VOL 33**, 8.
- 184 **Michalewicz, Z.** *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. (Springer-Verlag, , New York, , 1994).
- 185 **Vujcic, V.V.K. and M., C.M.** TABU Search methodology in GlobalbOptimization *Computers and Mathematics with Applications*, , 1998, **37**(5), 125-133.
- 186 **Robbins, H. and Munro, S.** A stochastic approximation method. *Ann. Math. Stat.*, 2004, **22**, 400-407.

- 187 Simha, R. and Kurose, J.F.** On-line Minimization of Call Setup Time via Load Balancing: A Stochastic Approximation Approach. *IEEE Transactions on Communications*, 1994 **42**(2/3/4), 1141-1144.
- 188 Duncan, J.L., Marciniak, Z. and Hu, S.J.** *Mechanics of Sheet Metal Forming*. (Butterworth-Heinemann 2002).
- 189 Иванов, М.Н.** *ДЕТАЛИ МАШИН*. (Высшая Школа Москва 1976).
- 190 Steuer, R.E.** *Multiple Criteria Optimization: Theory, Computations, and Application*. (John Wiley & Sons, Inc, New York, 1986).
- 191 Sawaragi, Y., Nakayama, H. and Tanino, T.** *Theory of Multiobjective Optimization*. (FL: Academic Press Inc, Orlando, 1985).

Anexo I. Determinación de las variaciones del espesor y radio del tubo con carga axial σ_{xf} variable y presión interna P_i constante en el Software Mathematical® 7

```
(*****RUTINA TOTAL VALORES*****)
ClearAll["Global`*"]

TimeUsed[]
GR2RAD = Pi / 180.;
R = 50.8
phi = 25.4
t = 0.9
DOB = R / phi
r = (phi - t) / 2
Pin = 16
F = cxf * pi * phi * t
Y = 350
cxf = 40
i = 1

Do[ (
  Do[ (
    Ka[a_] := Log[(R + r) / (R + r * Cos[a])];
    K = Ka[a];

    com = Y / Sqrt[K^2 - K + 1];

    phi = ArcSin[F / (2 * Y * t * r)];

    tea[a_] := (1 + ((com + cxf) * (K + 1) + Pin * r * (K + 3) / (2 * t)) / ((com + cxf) * (K - 2) +
      Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[phi] / R)) * t; (*CHINO*)

    rea[a_] :=
      (1 - ((com + cxf) * (2 * K - 1) + Pin * r * (2 * K + 3) / (2 * t)) / ((com + cxf) * (K - 2) +
        Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[phi] / R)) * r; (*CHINO*)

    tea1 = tea[a];

    rea1 = rea[a];

    arreglotea1[i] = tea1;

    arregloa[i] = a;
    arregloPin[i] = Pin;
    arreglocxf[i] = cxf;
    arreglocom[i] = com;
```

```

arregloDOB[i] = DOB;
arregloK[i] = K;
arreglorea[i] = rea1;

imax = 1;
i++;},
( $\alpha$ , 0, 360 * GR2RAD, 10 * GR2RAD)]],
({ $\alpha$ f, {30, 40, 50}})];

Print["Grafica de ta contra  $\alpha$ "]
Tabtae1 = Table[arreglotae1[i], {i, 1, imax, 1}];
Taba = Table[arregloa[i], {i, 1, imax, 1}];
Tabatae = Table[{arregloa[i], arreglotae1[i]}, {i, imax}];
TabataeG = Table[(arregloa[i] / GR2RAD, arreglotae1[i]), {i, imax}];

(* GRAFICAS ta contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabatae, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabataeG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]

(* TABLA VALORES *)
Tabatae = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arreglotae1[i], arreglorea[i],
  arregloPin[i], arreglo $\alpha$ f[i], arreglo $\alpha$ cm[i], arregloDOB[i], arregloK[i]}, {i, imax}];
Tabare = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arreglorea[i]}, {i, imax}];
TableForm[Tabatae, ,
  TableHeadings -> {Automatic, {" $\alpha$ ", " $\alpha$ GRAD", "ta", "ra", "Pin", " $\alpha$ f", " $\alpha$ cm", "DOB", "K"}}]
(*la tabla que esta abajo*)
Export["TabJLHOInicio.xls", %]
Tabare = Table[{(arregloa[i]), arreglorea[i]}, {i, imax}];
TabareG = Table[{(arregloa[i]) / GR2RAD, arreglorea[i]}, {i, imax}];

(* GRAFICA re contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabare, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabareG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
imax

```

Anexo II. Determinación de las variaciones del espesor y radio del tubo con presión interna P_i variable y carga axial σ_{xf} constante en el Software Mathematical® 7

```
(*****RUTINA TOTAL VALORES*****)
ClearAll["Global`*"]
TimeUsed[]
GR2RAD = Pi / 180.;
R = 50.8
φ = 25.4
t = 0.9
DOB = R / φ
r = (φ - t) / 2
Pin = 16
F = σxf * π * φ * t
Y = 350
σxm = 40
i = 1

Do[(
  Do[
    (
      Ka[a_] := Log[(R + r) / (R + r * Cos[a])];
      K = Ka[a];

      σxm = Y / Sqrt[K^2 - K + 1];

      φ = ArcSin[F / (2 * Y * t * r)];

      tea[a_] := (1 + (((σxm + σxf) * (K + 1) + Pin * r * (K + 3) / (2 * t)) /
        ((σxm + σxf) * (K - 2) + Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[φ]) / R)) * t;

      rea[a_] := (1 - (((σxm + σxf) * (2 * K - 1) + Pin * r * (2 * K + 3) / (2 * t)) /
        ((σxm + σxf) * (K - 2) + Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[φ]) / R)) * r;

      teal = tea[a];

      real = rea[a];

      arregloteal[i] = teal;

      arregloa[i] = a;
      arregloPin[i] = Pin;
      arregloσxf[i] = σxf;
      arregloσxm[i] = σxm;
```



```

    arreglorea[i] = real;

    imax = i;
    i++;
    ( $\alpha$ , 0,  $360 * GR2RAD$ ,  $10 * GR2RAD$ )]],
    (Pin, {14, 16, 18}));

Print["Grafica de ta contra  $\alpha$ "]
Tabteal = Table[arregloteal[i], {i, 1, imax, 1}];
Taba = Table[arregloa[i], {i, 1, imax, 1}];
Tabatea = Table[{arregloa[i], arregloteal[i]}, {i, imax}];
TabateaG = Table[{arregloa[i] / GR2RAD, arregloteal[i]}, {i, imax}];

(* GRAFICAS te contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabatea, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabateaG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
(* TABLA VALORES *)
Tabatea = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arregloteal[i], arreglorea[i],
  arregloPin[i], arreglo $\alpha$ f[i], arreglo $\alpha$ m[i], arregloDOB[i], arregloK[i]}, {i, imax}];
Tabarea = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arreglorea[i]}, {i, imax}];
TableForm[Tabatea, ,
  TableHeadings -> {Automatic, {" $\alpha$ ", " $\alpha$ GRAD", "ta", "ra", "Pin", " $\alpha$ f", " $\alpha$ m", "DOB", "K"}}]
Export["TabJLHOinicio.xls", %]
Tabarea = Table[{(arregloa[i]), arreglorea[i]}, {i, imax}];
TabareaG = Table[{(arregloa[i]) / GR2RAD, arreglorea[i]}, {i, imax}];
(* GRAFICA re contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabarea, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabareaG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
imax

```

Anexo III. Determinación de los intervalos de los valores de la variable de coordinación Presión interna P_i en el Software Mathematical® 7

```
(*****RUTINA TOTAL VALORES*****)
ClearAll["Global`*"]

TimeUsed[]
GR2RAD = Pi / 180.;
R = 50.8
phi = 25.4
t = 0.9
DOB = R / phi
r = (phi - t) / 2
Pin = 16
F = coef * pi * phi * t
Y = 350
coef = 40
i = 1

Do[(
  Do[
    (
      (*****
      *****)

      Ka[a_] := Log[(R + r) / (R + r * Cos[a])];
      K = Ka[a];

      com = Y / Sqrt[K^2 - K + 1];

      phi = ArcSin[F / (2 * Y * t * r)];

      tea[a_] := (1 + (((com + coef) * (K + 1) + Pin * r * (K + 3) / (2 * t)) /
        ((com + coef) * (K - 2) + Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[phi]) / R)) * t;

      rea[a_] :=
        (1 - (((com + coef) * (2 * K - 1) + Pin * r * (2 * K + 3) / (2 * t)) / ((com + coef) * (K - 2) +
          Pin * r * K / (2 * t))) * (r * (Cos[a] + Sin[phi]) / R)) * r; (*CHINO*)

      teal = tea[a];

      real = rea[a];

      arregloteal[i] = teal;

      arreglora[i] = a;
```

```

    arregloPin[i] = Pin;
    arregloxf[i] =  $\alpha$ xf;
    arregloxm[i] =  $\alpha$ xm;
    arregloDOB[i] = DOB;
    arregloK[i] = K;
    arregloea[i] = rea1;
    imax = i;
    i++;
    ( $\alpha$ , 0, 360 * GR2RAD, 10 * GR2RAD)]],
    (Pin, (12, 14, 16, 18, 20)]);
Print["Grafica de ta contra  $\alpha$ "] (*comentario*)
Tabtea1 = Table[arreglotad[i], {i, 1, imax, 1}];
Taba = Table[arregloa[i], {i, 1, imax, 1}];
Tabtea = Table[{arregloa[i], arreglotad[i]}, {i, imax}];
TabteaG = Table[{arregloa[i] / GR2RAD, arreglotad[i]}, {i, imax}];

(* GRAFICAS ta contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabtea, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabteaG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "ta"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]

(* TABLA VALORES *)
Tabtea = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arreglotad[i], arregloea[i],
  arregloPin[i], arregloxf[i], arregloxm[i], arregloDOB[i], arregloK[i]}, {i, imax}];
Tabrea = Table[{arregloa[i], arregloa[i] / GR2RAD, arregloea[i]}, {i, imax}];
TableForm[Tabtea, ,
  TableHeadings -> {Automatic, {" $\alpha$ ", " $\alpha$ GRAD", "ta", "ra", "Pin", " $\alpha$ xf", " $\alpha$ xm", "DOB", "K"}}]
(*la tabla que esta abajo*)
Export["TabJLH0inicio.xls", %]
Tabrea = Table[{(arregloa[i]), arregloea[i]}, {i, imax}];
TabreaG = Table[{(arregloa[i]) / GR2RAD, arregloea[i]}, {i, imax}];

(* xGRAFICA re contra  $\alpha$  *)
ListPlot[Tabrea, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$ ", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
ListPlot[TabreaG, AxesOrigin -> {0, 0},
  AxesLabel -> {" $\alpha$  °", "rea"}, PlotStyle -> PointSize[0.01]]
imax

```

Anexo IV. Determinación de la variación de las funciones objetivo en función de los valores de las variables de coordinación carga axial σ_{xf} y Presión interna P_i en el Software Mathematical® 7

```
ClearAll["Global`*"]
```

```
r = 12.25
```

```
R = 50.8
```

```
t = .9
```

```
Sxfo = 30
```

```
Pino = 14
```

```
Sxff = 50
```

```
Pinf = 18
```

$$ft = \frac{\left((Y + Sxf) + \frac{3 r Pin}{2 t} \right) \left(r \left(1 + \frac{\pi Sxf}{Y} \right) \right)}{R (2 (Y + Sxf))}$$

```
Minimize[{ft, (Sxfo < Sxf < Sxff), (Pino < Pin < Pinf)}, {Pin, Sxf}]
```

```
Plot3D[ $\left( \frac{\left( (Y + Sxf) + \frac{3 r Pin}{2 t} \right) \left( \frac{r}{R} + \frac{(\pi r) Sxf}{Y R} \right)}{2 (Y + Sxf)} \right)$ , {Sxf, Sxfo, Sxff},  
{Pin, Pino, Pinf}], AxesLabel -> {"Sxf", "Pin", "ft"}]
```

```
K2 = Log[(r + R) / R]
```

```
com2 = Y / Sqrt[K2^2 - K2 + 1]
```

$$Dmax = 2 + r \left(1 - \frac{\pi r Sxf \left(\frac{Pin ((2 K2 + 3) r)}{2 t} + (2 K2 - 1) (Sxf + com2) \right)}{(R Y) \left(\frac{K2 Pin r}{2 t} + (K2 - 2) (Sxf + com2) \right)} \right)$$

$$ro = \left(1 - \frac{\left(Y + Sxf - \frac{3 r Pin}{2 t} \right) \left(\frac{r}{R} + \frac{\pi r Sxf}{Y R} \right)}{2 (Y + Sxf)} \right) r$$

```
K3 = Log[(r + R) / (R - r)]
```

$$\alpha m3 = Y / \text{Sqrt}[K3^2 - K3 + 1]$$

$$r3 = r \star$$

$$\left(1 - \left(\left((\alpha m3 + Sxf) (2 K3 - 1) + \frac{\text{Pin } r (K3 + 3)}{2 t} \right) \left(\frac{\pi r Sxf}{Y R} - \frac{r}{R} \right) \right) / \left((\alpha m3 + Sxf) (K3 - 2) + \frac{\text{Pin } r K3}{2 t} \right) \right)$$

$$Dmin = ro + r3$$

$$fp = (Dmax - Dmin) / (2 r)$$

$$\text{Minimize}[\{fp, (Sxfo < Sxf < Sxff), (Pino < Pin < Pinf)\}, \{Pin, Sxf\}]$$

$$\text{Plot3D}[fp, \{Sxf, Sxfo, Sxff\}, \{Pin, Pino, Pinf\} \star, \text{AxesLabel} \rightarrow \{\text{"Sxf"}, \text{"Pin"}, \text{"fp"}\} \star]$$

$$fw = \frac{\alpha m3 - Sxf - \frac{\text{Pin } r}{2 t}}{\alpha m3 - Sxfo - \frac{\text{Pino } r}{2 t}}$$

$$\text{Minimize}[\{fw, (Sxfo < Sxf < Sxff), (Pino < Pin < Pinf)\}, \{Pin, Sxf\}]$$

$$\text{Plot3D}[fw, \{Sxf, Sxfo, Sxff\}, \{Pin, Pino, Pinf\} \star, \text{AxesLabel} \rightarrow \{\text{"Sxf"}, \text{"Pin"}, \text{"fw"}\} \star]$$

Anexo V. Resultados del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el Mathematical ® 7

```

ClearAll["Global`*"]

w = 1;
Y = 350;
r = 12.25;
R = 50.8;
t = 0.9;
aa = 1;

Pino = 14;
Pinf = 18;
Sxfo = 30;
Sxff = 50;

intPin = (Pinf - Pino) / 66.
intSxf = (Sxff - Sxfo) / 66.

Pinmin = Pino;
Pinmax = Pinf;
Sxfmin = Sxfo;
Sxfmax = Sxff;
Zrec = 500

kk = 1

a = 1;
b = 1;
c = 1;

d = 1

i = 1;
j = 1;
b = 1;

dPin = (Pinmax - Pinmin) / 3.;
dSxf = (Sxfmax - Sxfmin) / 3.;

dPini = Pinmax - Pinmin;

```

```

Pin1 = Pinmin + dPin;
Sxf1 = Sxfmin + dSxf;

Pin2 = Pinmin + 2 * dPin;
Sxf2 = Sxfmin + 2 * dSxf;

Print["dPin ", dPin, " dSxf ", dSxf, " Pin1 ",
      Pin1, " Pin2 ", Pin2, " Sxf1 ", Sxf1, " Sxf2 ", Sxf2]

K2 = Log[(r + R) / R];
com2 = Y / Sqrt[K2^2 - K2 + 1];
K3 = Log[(r + R) / (R - r)];
com3 = Y / Sqrt[K3^2 - K3 + 1];

ftf = Function[(Pin, Sxf),
  (Y + Sxf +  $\frac{1.5 * r * Pin}{t}$ ) * ( $\frac{r}{R} + \frac{(Pi * r) * Sxf}{Y * R}$ ) / (2 * (Y + Sxf))] [Pin, Sxf];

fpf = Function[(Pin, Sxf),  $\left( 2 * r \left( 1 - \frac{\pi r Sxf \left( \frac{Pin ((2 K2 + 3) r)}{2 t} + (2 K2 - 1) (Sxf + com2) \right)}{(R Y) \left( \frac{K2 Pin r}{2 t} + (K2 - 2) (Sxf + com2) \right)} \right) - \right.$ 
  ( $\left( 1 - \frac{(Y + Sxf - \frac{2 * r * Pin}{2 t}) \left( \frac{r}{R} + \frac{\pi r * Sxf}{Y R} \right)}{2 (Y + Sxf)} \right) r + r * \left( 1 - \left( \frac{(com3 + Sxf) (2 K3 - 1) + \frac{Pin r (K3 + 3)}{2 t}}{\left( \frac{\pi r Sxf}{Y R} - \frac{r}{R} \right)} \right) / \left( (com3 + Sxf) (K3 - 2) + \frac{Pin r K3}{2 t} \right) \right) \right] / (2 * r)$ ] [Pin, Sxf];

fwf = Function[(Pin, Sxf),  $\left( com3 - Sxf - \frac{Pin r}{2 t} \right) / \left( com3 - Sxfo - \frac{Pino * r}{2 t} \right)$ ] [Pin, Sxf];

(*fcf=Function[(Pin,Sxf),Pin*r/(Y*t)] [Pin,Sxf];*)

ftd = Min[Table[ftf, {Pin, Pino, Pinf}, {Sxf, Sxfo, Sxff}]]
fpd = Min[Table[fpf, {Pin, Pino, Pinf}, {Sxf, Sxfo, Sxff}]]
fwd = Min[Table[fwf, {Pin, Pino, Pinf}, {Sxf, Sxfo, Sxff}]]

ftd = 0.290492505
fpd = 0.070387186
fwd = 0.943551235

```

```

ftd = 0.312832702
fpd = 0.077983869
fwd = 0.943551235

ftd = 0.312832702
fpd = 0.081782211
fwd = 0.830653705

ftd = Min[Table[ftf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]
fpd = Min[Table[fpf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]
fwd = Min[Table[fwf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]

ftdM = Max[Table[ftf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]
fpdM = Max[Table[fpf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]
fwdM = Max[Table[fwf, {Pin, Pino, Pinf, .1}, {Sxf, Sxfo, Sxff, .1}]]

ftdm[i1_] := (ftdM - ftd) * i1 + ftd;
fpdm[i1_] := (fpdM - fpd) * i1 + fpd;
fwdm[i1_] := (fwdM - fwd) * i1 + fwd;

i = 1; j = 1;
k = 1;

w1 = 1
w2 = 1
w3 = 1

aa = 1;
bb = 1;
cc = 1;
Do[
(
  ftd1 = ftdm[aa];

  Do[(
    fpd1 = fpdm[bb];
    Do[(
      fwd1 = fwdm[cc];

```



```

arregloftdr[i, j, k] = ftd1;
arreglofpdr[i, j, k] = fpd1;
arreglofwdr[i, j, k] = fwd1;

a = 1;
Do[(

    Do[(

        drft = w1 * Abs[ (ftf - ftd1) ];
        drfp = w2 * Abs[ (fpf - fpd1) ];
        drfw = w3 * Abs[ (fwf - fwd1) ];

        arregloft[a] = ftf;
        arreglofp[a] = fpf;
        arreglofw[a] = fwf;

        arreglodrft[a] = drft;
        arreglodrfp[a] = drfp;
        arreglodrfw[a] = drfw;
        arreglomax[a] = Max[drft, drfp, drfw];

        arregloPin[a] = Pin;
        arregloSxf[a] = Sxf;

        amax = a; a++;
    )
    ,
    {Pin, Pinmin, Pinmax, intPin}];

),
{Sxf, Sxfmin, Sxfmax, intSxf}];

tabmax = Table[arreglomax[a], {a, 1, amax}];
Optimo = Min[tabmax];
g = Flatten[Position[tabmax, Min[tabmax]]] // TableForm;
pos = g[[1]];
tmin = pos[[1]];

Foptimo = arregloPin[tmin];
Sxfoptimo = arregloSxf[tmin];

```

```

ftop = arregloft[tmin];
fpop = arreglofp[tmin];
fwop = arreglofw[tmin];

xr = Poptimo;
yr = Sxfoptimo;
Pin = xr;
Sxf = yr;
arregloftf1[i, j, k] = ftop;
arreglofpf1[i, j, k] = fpop;
arreglofwf1[i, j, k] = fwop;
(*arreglofcf1[i, j, k, l] = fcf1;*)
arregloil[i, j, k] = i;
arreglojl[i, j, k] = j;
arreglokl[i, j, k] = k;
(*arregloli[i, j, k, l] = l;*)

arregloxr[i, j, k] = xr;
arregloyr[i, j, k] = yr;

kmax = k; k++;

),
(cc, 0, 1, 1/3)];

jmax = j; j++;
k = 1;
(bb, 0, 1, 1/3)];

imax = i; i++;
j = 1;
(aa, 0, 1, 1/3)]
i = 1;
TabTot = Table[{arregloxr[i, j, k], arregloyr[i, j, k], arregloftf1[i, j, k],
arreglofpf1[i, j, k], arreglofwf1[i, j, k], arregloftdr[i, j, k],
arreglofpdr[i, j, k], arreglofwdr[i, j, k], arregloil[i, j, k],
arreglojl[i, j, k], arreglokl[i, j, k]}, {i, 1, imax}, {j, 1, jmax}, {k, 1, kmax}];
TabTot1 = Flatten[TabTot, 3];
TableForm[TabTot1, TableHeadings ->
{Automatic, {"Pin", "Sxf", "ft", "fp", "fw", "ftd", "fpd", "fwd", "i", "j", "k"}}]
Export["TabResPropios19082011.xls", %]

```

```

amax = a; a++;
)
,
(Pin, Pinmin2, Pinmax2, intPin2))

,
(Sxf, Sxfmin2, Sxfmax2, intSxf2))
amax
tabft = Table[arregloft[a], {a, 1, amax}];
tabfp = Table[arreglofp[a], {a, 1, amax}];
tabfw = Table[arreglofw[a], {a, 1, amax}];
tabmax = Table[arreglomap[a], {a, 1, amax}];

tabftpw = Table[{arregloft[a], arreglofp[a], arreglofw[a], arregloPin[a], arregloSxf[a],
arreglodrft[a], arreglodrfp[a], arreglodrfw[a], arreglomap[a]}, {a, 1, amax}];

TableForm[tabftpw, , TableHeadings ->
(Automatic, {"ft", "fp", "fw", "Pin", "Sxf", "drft", "drfp", "drfw", "max"})]
Print["Min= ", Min[tabmax]]

Optimo = Min[tabmax];
g = Flatten[Position[tabmax, Min[tabmax]]] // TableForm;
pos = g[[1]];
tmin = pos[[1]];

Poptimo2 = arregloPin[tmin]
Sxfoptimo2 = arregloSxf[tmin]
ftop = arregloft[tmin]
fpop = arreglofp[tmin]
fwop = arreglofw[tmin]

Print["posi= ", tmin, " Poptimo2 ", Poptimo2, " Sxfoptimo2 ",
Sxfoptimo2, " ftop ", ftop, " fpop ", fpop, " fwop ", fwop]

Flatten[Table[{i, j, k, arregloftdr[i, j, k], arreglofpdr[i, j, k], arreglofwdr[i, j, k]},
{i, 1, imax}, {j, 1, jmax}, {k, 1, kmax}], 2]
TableForm[%, , TableHeadings -> (Automatic, {"i", "j", "k", "ftd", "fpd", "fwd"})]

```

Anexo VI. Verificación del modelo de optimización matemática por el método de Chevichev implementado en el software MATHEMATICAL® 7

```

ClearAll["Global`*"]

(* syntax GoalAttainment[{{{f1,goal1,weight1},...},cons),vars]]*)
GoalProgrammingChebyshev[fg:{{_,_}..}, cons_, vars_, opts___?OptionQ] := With[
  (res = Catch[iGoalProgrammingChebyshev[
    (Map[(Append@@# &), Thread[(fg, ConstantArray[1, (Length[fg])])]]], cons), vars]]],
  res /; ListQ[res]
];
GoalProgrammingChebyshev2[fg:{{_,_,_}..}, cons_, vars_, opts___?OptionQ] := With[
  (res = Catch[iGoalProgrammingChebyshev[fg, cons], vars]]],
  res /; ListQ[res]
];
iGoalProgrammingChebyshev[fg:{{_,_,_}..}, cons_, vars_, opts___?OptionQ] := Module[
  (fs, goals, y, res, ws),
  (fs, goals, ws) = Transpose[fg];
  If[! VectorQ[ws, (# >= 0 &)], Throw[$Failed]];
  If[! VectorQ[goals, ((NumericQ[#] && Head[#] != Complex) &)], Throw[$Failed]];
  res = FindMinimum[{y, (And@@Flatten[(cons), 1]) && (And@@Thread[y >= ws * (fs - goals)])},
    Append[Flatten[(vars), 1], y], opts];
  If[ListQ[res], (fs /. res[[2]], Thread[vars -> (vars /. res[[2])])]]
];

Y = 350;
r = 12.25;
R = 50.8;
t = 0.9;
aa = 1;

xo = 14;
xf = 18;
yo = 30;
yf = 50;

xmin = xo;
xmax = xf;
ymin = yo;
ymax = yf;

K2 = Log[(r + R) / R];
ccm2 = Y / Sqrt[K2^2 - K2 + 1];
K3 = Log[(r + R) / (R - r)];
ccm3 = Y / Sqrt[K3^2 - K3 + 1];

ftf = Function[{x, y}, (Y + y + (1.5 * r * x) / t) * (r / R + (Pi * r) * y / (Y * R)) / (2 * (Y + y))][x, y];

```

```

ftf1 = Function[(Pin, Sxf),
  (Y + Sxf +  $\frac{1.5 * r * Pin}{t}$ ) * ( $\frac{r}{R} + \frac{(Pi * r) * Sxf}{Y * R}$ ) / (2 * (Y + Sxf))] [Pin, Sxf];

Minimize[(ftf1, (30 < Sxf < 50), (14 < Pin < 18)), (Pin, Sxf)]

fpf = Function[(x, y), (2 * r (1 - (pi * y ( $\frac{x ((2 K2 + 3) r)}{2 t} + (2 K2 - 1) (y + com2)$ ))) /
  ((R Y) ( $\frac{K2 x r}{2 t} + (K2 - 2) (y + com2)$ ))) -
  ((1 - ( $\frac{(Y + y - \frac{3 * r * x}{2 t}) (\frac{r}{R} + \frac{x * y}{Y R})}{2 (Y + y)}$ )) * r + r * (1 - ((com3 + y) (2 K3 - 1) +  $\frac{x r (K3 + 3)}{2 t}$ ))
  ( $\frac{pi * y}{Y R} - \frac{r}{R}$ )) / ((com3 + y) (K3 - 2) +  $\frac{x r K3}{2 t}$ )))] / (2 * r)] [x, y];

fpf1 = Function[(Pin, Sxf), (2 * r (1 -  $\frac{pi * Sxf (\frac{Pin ((2 K2 + 3) r)}{2 t} + (2 K2 - 1) (Sxf + com2))}{(R Y) (\frac{K2 Pin r}{2 t} + (K2 - 2) (Sxf + com2))}$ ) -
  ((1 - ( $\frac{(Y + Sxf - \frac{3 * r * Pin}{2 t}) (\frac{r}{R} + \frac{pi * r * Sxf}{Y R})}{2 (Y + Sxf)}$ )) * r + r * (1 - ((com3 + Sxf) (2 K3 - 1) +  $\frac{Pin r (K3 + 3)}{2 t}$ ))
  ( $\frac{pi * r * Sxf}{Y R} - \frac{r}{R}$ )) / ((com3 + Sxf) (K3 - 2) +  $\frac{Pin r K3}{2 t}$ )))] / (2 * r)] [Pin, Sxf];

Minimize[(fpf1, (30 < Sxf < 50), (14 < Pin < 18)), (Pin, Sxf)]

fwf = Function[(x, y), (com3 - y -  $\frac{x r}{2 t}$ ) / (com3 - y0 -  $\frac{x0 * r}{2 t}$ )] [x, y];

fwf1 = Function[(Pin, Sxf), (com3 - Sxf -  $\frac{Pin r}{2 t}$ ) / (com3 - y0 -  $\frac{x0 * r}{2 t}$ )] [Pin, Sxf];

Minimize[(fwf1, (30 < Sxf < 50), (14 < Pin < 18)), (Pin, Sxf)]

fcf = Function[(x, y), (x * r / (Y * t))] [x, y];

```

```

fcf1 = Function[{Pin, Sxf}, (Pin * r / (Y * t))][Pin, Sxf];

Table[fcf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}];

ftd = Min[Table[ftf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fpd = Min[Table[fpf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fwd = Min[Table[fwf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fed = Min[Table[fcf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]

ftdM = Max[Table[ftf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fpdM = Max[Table[fpf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fwdM = Max[Table[fwf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]
fedM = Max[Table[fcf, {x, xo, xf, .1}, {y, yo, yf, .1}]]

Print["ftd ", ftd, "   fpd ", fpd, "   fwd ", fwd, "   fed ", fed,
      " ftdM ", ftdM, "   fpdM ", fpdM, "   fwdM ", fwdM, "   fedM ", fedM]

w1 = 1;
w2 = 1;
w3 = 1;
w4 = 1;

ftdm[i1_] := (ftdM - ftd) * i1 + ftd;
fpdm[i1_] := (fpdM - fpd) * i1 + fpd;
fwdm[i1_] := (fwdM - fwd) * i1 + fwd;
fedm[i1_] := (fedM - fed) * i1 + fed;

i = 1; j = 1;
k = 1; l = 1;

```

```

Do[
{

    ftdr = ftdm[aa];

    Do[{
        fpdr = fpdm[bb];
        Do[{

            fwdr = fwdm[cc];

            arregloftdr[i, j, k, 1] = ftdr;
            arreglofpdr[i, j, k, 1] = fpdr;
            arreglofwdr[i, j, k, 1] = fwdr;

            res2 = GoalProgrammingChebyshev[{{(w1 + ftf, ftdr), (w2 + fpf, fpdr), (w3 + fwf, fwdr)
                }, {(w4 + fcf, fcd)}, {x >= 14, x <= 18, y >= 20, y <= 50}}, {x, y}],
            res2,
            res2[[1]],
            res2[[2]],
            xr = x /. res2[[2]],
            yr = y /. res2[[2]],
            Pin = xr,
            Sxf = yr,
            arregloftfl[i, j, k, 1] = ftf,
            arreglofpfl[i, j, k, 1] = fpf,
            arreglofwfl[i, j, k, 1] = fwf,

            arregloil[i, j, k, 1] = i,
            arreglojl[i, j, k, 1] = j,
            arreglokl[i, j, k, 1] = k,

            arregloxr[i, j, k, 1] = xr,
            arregloyr[i, j, k, 1] = yr,

            kmax = k; k++;
        }],
        {cc, 0, 1, 1/3}],

    jmax = j; j++;
    k = 1;
    {bb, 0, 1, 1/3}],

    imax = i; i++;
    j = 1;
    {aa, 0, 1, 1/3}]

```

```

ftdM
ftdm
imax
jmax
yr
TabTot = Table[{arregloxr[i, j, k, l], arregloyr[i, j, k, l], arregloftfl[i, j, k, l],
arreglofpfl[i, j, k, l], arreglofwfl[i, j, k, l], arregloftdr[i, j, k, l],
arreglofpdr[i, j, k, l], arreglofwdr[i, j, k, l], (*arreglofcdl[i, j, k, l], *)
arregloil[i, j, k, l] = i, arreglojl[i, j, k, l] = j, arreglok1[i, j, k, l] (*,
arreglol1[i, j, k, l] *)}, {i, 1, imax}, {j, 1, jmax}, {k, 1, kmax} (*, {l, 1, lmax} *)];
TabTot1 = Flatten[{TabTot}, 3];
TableForm[TabTot1, , TableHeadings ->
{Automatic, {"Pin", "Sxf", "ft", "fp", "fw", "ftd", "fpd", "fwd", "i", "j", "k"}}]
Export["TabResulta18082011.xls", %]
Table[arregloxr[i, j, k, l], {i, 1, imax}, {j, 1, jmax}, {k, 1, kmax}];
Table[{i, j, k, l}, {i, 1, imax}, {j, 1, jmax}, {k, 1, kmax}];
x = 1; y = 2
ftf
res2[[1]]
ftf / res2[[1]]
x = xr; y = yr
ftf

```