

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Gerencia de Posgrado



*Simulación mediante método de elementos finitos para
conformado de un perfil helicoidal cóncavo de chapa
metálica*

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Hugo Estrada Pimentel
Asesores: Dr. John Edison García Herrera
Dr. Hugo Arcos Gutiérrez

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Lerma, Estado de México
diciembre, 2023

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

San Luis Potosí, San Luis Potosí, 29 de noviembre del 2023.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ing. Hugo Estrada Pimentel, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis, titulado "SIMULACIÓN MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA CONFORMADO DE UN PERFIL HELICOIDAL CÓNCAVO DE CHAPA METÁLICA" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Dr. John Edison Garcia Herrera
Asesor Académico

Dr. Hugo Arcos Gutiérrez
Co-Asesor Académico

F31a Revisión: 01-Jun-2021

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



GOBIERNO DE
MÉXICO



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



CIATEQ

San Luis Potosí, San Luis Potosí, 6 de Diciembre del 2023.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Hugo Estrada Pimentel**, cuyo título es:

"SIMULACIÓN MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA CONFORMADO DE UN PERFIL HELICOIDAL CÓNCAVO DE CHAPA METÁLICA"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

Dr. Isaías Emmanuel Garduño Olvera

F31b Revisión: 04-Feb-2022

Zona Industrial del Potosí en el Eje 126, C.P. 78395, San Luis Potosí, S.L.P. México
Tel: +52 (444) 824 0310 www.ciateq.mx



2023
Francisco
VILA

DEDICATORIA

A mi padre, mi madre y hermanos por el apoyo incondicional a lo largo de mi formación como estudiante y como profesional. Ellos me han brindado los valores que me han permitido superarme constantemente y son la fuente de mi motivación.

A mi pareja Mónica, por el apoyo incondicional y sus valiosos consejos que me motivan continuamente a ser una mejor persona.

A mis amigos ex baja, con los cuales pude descubrir mi vocación como ingeniero, han estado siempre alentándome a no desistir para continuar con mi formación.

A mis sobrinas, familia y amigos que siempre están para aligerar la carga.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater la Facultad de Ingeniería de la UAEMex donde gracias a sus excelentes profesores adquirí conocimiento que me inspira a poner mi granito de arena para buscar transformar el mundo a través de la ingeniería.

Agradezco al Ing. Víctor Arochi Lascari, por las facilidades que he recibido de su parte para el desarrollo de mi tema de tesis y de manera general a la compañía Martin Sprocket & Gear planta Toluca, por el apoyo que me ha brindado en la adquisición de nuevo conocimiento.

A mis asesores el Dr. John Edison García Herrera y al Dr. Hugo Arcos Gutiérrez por su gran disposición y valiosa aportación para el desarrollo de este documento.

A mis compañeros de trabajo en especial a Mauricio García Hernández por apoyarme de manera desinteresada y siempre con gran entusiasmo.

* * *

RESUMEN

En este estudio, se aborda la importante problemática relacionada con la precisa predicción del fenómeno de recuperación elástica (spring back, SB) durante el conformado de metales, especialmente en la aplicación de los transportadores helicoidales intercambiadores de calor. En este caso, los perfiles cóncavos se obtienen a partir de preforma y posterior conformado de un solo paso. El proceso de propuesto y presentado, evita el paso previo de preformado, mediante la implementación de herramientas menos robustos que permiten la deformación por secciones de la placa metálica hasta lograr el perfil helicoidal cóncavo completo. Esto resulta en una significativa reducción en la presión requerida para el proceso.

La metodología utilizada se basa en la simulación computacional a través del software ANSYS Workbench, debido a su eficiencia en términos de tiempo y recursos económicos. Se realizó un análisis estático estructural para simular el conformado de un perfil de chapa de acero inoxidable 304 de $\frac{1}{4}$ " (6.35 mm) de espesor, empleando los dos herramientas diseñados específicamente. Los resultados de la simulación numérica respaldaron la efectividad de la estrategia propuesta para el proceso conformado. Para corroborar los hallazgos teóricos, se llevaron a cabo pruebas físicas experimentales utilizando prototipos de las herramientas, midiendo el ángulo de doblez transversal de la pieza obtenida. Los resultados experimentales mostraron una pequeña diferencia en el ángulo de doblez que genera la cavidad de 0.5° , en comparación con el diseño en 3D del perfil y de 0.24° en comparación con el deformado en simulación. Este enfoque innovador no solo proporciona una solución efectiva para el conformado de perfiles helicoidales cóncavos, sino también destaca la relevancia de la simulación computacional como herramienta valiosa en la optimización de procesos de conformado de metales, especialmente cuando se busca minimizar el tiempo y los recursos invertidos en el desarrollo de herramientas y procesos.

Palabras clave: Procesos tecnológicos; Maquinaria para manejo de materiales; Simulación; CAE; Springback.

ABSTRACT

This study addresses the critical problem of accurately predicting the elastic recovery phenomenon (spring back, SB) during metal forming, especially in applying elliptical heat exchange conveyors. In this case, the concave profiles are obtained by performing and forming in a single step. The proposed and presented process avoids the previous step by implementing less robust tools that allow the deformation of the metal plate in sections until the complete concave helical profile is achieved. This results in a significant reduction in the pressure required for the process.

Due to its time and economic resources efficiency, the methodology is based on computer simulation through ANSYS Workbench software. A structural static analysis was conducted using the two specifically designed tools to simulate forming the 304 stainless steel sheet with a 1/4" (6.35 mm) thick profile. The numerical simulation results supported the effectiveness of the proposed strategy for the forming process. Experimental physical tests were conducted using the tools' prototypes to corroborate the theoretical findings, measuring the piece's transverse bending angle. The experimental results showed a slight difference in the bending angle generated by the cavity of 0.5°, compared to the 3D design of the profile, and 0.24° compared to the deformed one in simulation. This innovative approach provides an effective solution for forming concave helical profiles. It highlights the relevance of computational simulation as a valuable tool in optimizing metal-forming processes, especially when seeking to minimize the time and resources invested in developing tools and processes.

Keywords: Technological processes; Material handling machinery; Simulation; CAE; Spring back.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
GLOSARIO	xii
SIMBOLOGÍA	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	8
1.3. JUSTIFICACIÓN	9
1.4. OBJETIVOS.....	10
1.4.1. Objetivo general.....	10
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. HIPÓTESIS.....	10
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS.....	12
2.1.1. Curva esfuerzo – deformación.....	13
2.1.2. Ley de Hooke	14
2.1.3. Razón de Poisson (ν)	16
2.1.4. Ductilidad, fragilidad y porcentaje de elongación	17
2.2. RECUPERACIÓN ELÁSTICA, SPRINGBACK.....	18
2.2.1 Compensación de la recuperación elástica (springback).....	21
2.3. SUPERFICIES APAREADAS	22
2.4. CONFORMADO DE CHAPA METÁLICA.....	24
2.5. FORJADO	25
2.6. ACERO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS HERRAMENTALES	27
2.7. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	28
2.8. SIMULACIÓN NUMÉRICA POR FEM.....	31
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1. PROCESO PARA EL DISEÑO MECÁNICO	34

3.2. MODELADO CAD Y CONCEPTO DE DISEÑO	37
3.3. PROTOTIPADO RÁPIDO	39
3.4. MÉTODO DE CONFORMADO PROPUESTO (POR SECCIONES)	40
3.5. SIMULACIÓN NUMERICA MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS STATIC STRUCTURAL 41	
3.6. CONTACTOS	43
3.7. MALLADO	44
3.8. DESPLAZAMIENTOS	46
3.9. PRUEBAS EXPERIMENTALES	47
4. RESULTADOS	49
4.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	49
4.1.1. Esfuerzos	50
4.1.2. Deformaciones	51
4.1.3. Comparación del perfil deformado con el software ANSYS	52
4.2. RESULTADOS PRUEBA EXPERIMENTAL	53
4.2.1. Medición de pruebas experimentales	58
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	62
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	63
REFERENCIAS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del transportador helicoidal inventado por Arquímedes.	4
Figura 2. Transportador helicoidal, construcción general.	5
Figura 3. Dimensiones generales usados para la medición e identificación de seccionales helicoidales.	7
Figura 4. Los helicoidales sinfines de hélice hueca se utilizan para pasar líquidos de calefacción o refrigeración alrededor de la hélice espiral sinfín.	7
Figura 5. Curva esfuerzo – deformación típica para el acero.	13
Figura 6. Módulo de elasticidad de diferentes metales.	15
Figura 7. Recuperación o Springback, durante el proceso de doblado o conformado.	20
Figura 8. Método de Acuñado para compensación del SB.	21
Figura 9. Técnica de doble doblado (doubled- bend technique) para compensación del SB.	22
<i>Figura 10. Representación visual del comportamiento en superficies apareadas. .</i>	<i>23</i>
Figura 11. Esquema del proceso de conformado por estampado.	25
Figura 12. El modelo de FEA con condiciones de frontera fijo-fijo para la viga.	32
Figura 13. Pasos para el proceso de diseño mecánico.	36
Figura 14. Modelado 3D, a) dado hembra, b) dado macho y c) seccional helicoidal curvo.	38
Figura 15. Dimensiones generales para el perfil helicoidal de sección transversal cóncava.	38
Figura 16 . Proceso de impresión 3D de herramientas prototipo y montaje en prensa horizontal.	40
Figura 17. Concepto final modelado con el software Autodesk Inventor versión 2022.	40
Figura 18. Conformado por secciones de un perfil helicoidal cóncavo en placa de acero inoxidable 304 de ¼" de espesor.	41
Figura 19. Importación de modelos CAD al software ANSYS.	42
Figura 20. Configuración de los contactos del tipo áspero (rough) entre los herramientas y la pieza de trabajo.	44

Figura 21. Configuración del contacto con fricción entre los herramientales y la pieza de trabajo.....	44
Figura 22. Tamaño de elemento de 4 mm para la malla que representa la superficie de trabajo de los herramientales.	45
Figura 23. Tamaño de elemento de 2mm para la malla generada para el cuerpo solido antes del conformado.	45
Figura 24. Desplazamientos del dado superior primer simulación.....	47
Figura 25. Desplazamientos del dado superior segunda simulación.....	47
Figura 26. Esfuerzos equivalentes de Von Mises, tercera iteración para dos ciclos de carga.	50
Figura 27. Factores de seguridad, tercera iteración para dos ciclos de carga.....	51
Figura 28. Deformaciones y efecto del springback para dos ciclos de carga.....	52
Figura 29. Sección exportada sobrepuesta sobre modelo CAD. Primera simulación.	52
Figura 30. Sección exportada sobrepuesta sobre modelo CAD. Segunda simulación.	53
Figura 31. Angulo de dobléz para dos ciclos de carga.	53
Figura 32. Herramientales prototipos manufacturados en acero 4140 con endurecimiento superficial.....	54
Figura 33. Comparación física del herramientales prototipo y el utilizado en la planta de Burleson Texas, Estados Unidos.	55
Figura 34. Perfiles cortados en acero A36 para pruebas experimentales (lado izquierdo con la pieza preformada, lado derecho la pieza sin preformar).	56
Figura 35. Pieza preformada y conformada de placa de acero A36.	57
Figura 36. Prueba experimental para la pieza sin preformar del perfil cortado en placa de acero A36.....	57
Figura 37. Prueba experimental para la pieza sin preformar del perfil cortado en placa de acero A36.....	58
Figura 38. Medición del ángulo una vez hecho el ensamble, de dobléz en la parte posterior del alabe.	58
Figura 39. Medición del paso en el ensamble de los perfiles para alabe.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores aproximados del coeficiente de Poisson para varios materiales. .	17
Tabla 2. Coeficientes de fricción para algunas combinaciones de materiales.	24
Tabla 3. Factores de multiplicación para el cálculo de la fuerza de forjado.	26
Tabla 4. Tolerancias con base a estándares Martin y CEMA publicados.	39
Tabla 5. Propiedades mecánicas y composición química de acero AISI 4140.	42
Tabla 6. Propiedades mecánicas y composición química de acero inoxidable 304	43
Tabla 7. Análisis de convergencia de mallas	46

GLOSARIO

ATSM: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials).

CAD: Diseño Asistido por Ordenador (Computer Aided Design).

CAE: Ingeniería Asistida por Ordenador (Computer Aided Engineering).

CEMA: Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores (Conveyor Equipment Manufacturers Association).

Conformado: Proceso de manufactura para dar forma a perfiles de láminas y placas de metal delgadas mediante técnicas de doblado.

Ductilidad: Propiedad mecánica de los materiales que se refiere a su capacidad para deformarse plásticamente antes de romperse.

FEM: Método de Elemento Finito (Finite Element Method).

FDM: Modelado por Deposición Fundida (Fused Deposition Modeling).

HRC: Escala para medición de la dureza para aceros de alta resistencia, denominada como Rockwell.

Malla: Conjunto de elementos y nodos finitos.

Springback (SB): Recuperación elástica del material.

SIMBOLOGÍA

Δt : Intervalo de tiempo, cambio respecto al tiempo [s].

ϵ_{av} : Coeficiente de deformación media aproximada.

K_s : Coeficiente para el factor del springback.

σ_e : Esfuerzo de ingeniería, es la aplicada dividida entre el área transversal [MPa].

σ' : Esfuerzo equivalente de Von Mises [MPa].

ν : Razón de Poisson, es la cantidad de deformación lateral entre la deformación axial.

Y_s : Resistencia a la cedencia del material [MPa].

E : Módulo de elasticidad del material, también conocido como módulo de Young [N/m²].

N : Factor de seguridad.

V : Volumen del material [mm].

1. INTRODUCCIÓN

La industria metalmecánica es una de las más relevantes de los sistemas productivos industriales a nivel global, debido a que su objetivo está directamente enfocado en el aprovechamiento de los materiales derivados de los procesos metalúrgicos, los cuales a su vez sirven como materias primas que mediante los diversos procesos convencionales y no convencionales, son transformados para utilizarse como partes de maquinaria, herramientas o refaccionamiento de equipos para líneas de producción, principalmente (Yang et al., 2018). El impacto en los niveles de desarrollo tecnológico, científico, económico y de innovación que esta industria trae para cada país, va ligado directamente con su capacidad para manufacturar los productos respecto a diversos requerimientos locales o internacionales de calidad, costos, diseño, vida útil y eficiencia principalmente.

La Industria manufacturera por definición es: “el sector que comprende unidades económicas dedicadas principalmente a la transformación mecánica, física o química de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos; al ensamble en serie de partes y componentes fabricados; a la construcción de maquinaria y equipo industrial, comercial, de oficina y otros. El trabajo de transformación se puede realizar en sitios como plantas, fabricas, talleres, maquiladoras u hogares. Estas unidades económicas usan generalmente, maquinas accionadas por energía y equipo manual” (INEGI, 2023). Este sector representa un diferenciador muy importante que brinda fortaleza para la economía mexicana.

Uno de los procesos de fabricación más utilizados y transversal a los diferentes sectores de la industria metalmecánica, es el conformado de láminas metálicas, ya que con este se reduce el empleo de procesos más costosos como lo son el mecanizado y soldadura, es posible manufacturar componentes de la alta calidad en menor número de operaciones y con altos volúmenes producción. Existen diversos métodos para conformar láminas o placas metálicas, sin embargo, estos suelen ser procesos de fabricación complejos, debido a los grandes esfuerzos y

deformaciones involucradas, y a los diversos parámetros que afectan el rendimiento y calidad de los productos finales. En consecuencia, el diseño de los herramientas para las aplicaciones de chapa metálica depende del análisis y modelado preciso del comportamiento del perfil de lámina que se pretende deformar. Aunque el diseño del herramental está relacionado directamente con la geometría del producto final, la forma de la pieza también depende del grado de recuperación elástica del material, fenómeno también conocido como "springback, SB" (Ma & Welo, 2021), (Gardner & Yun, 2018), (Wu, F., Hong, Y., Zhang, Z., Huang, C., & Huang, Z, 2023).

El conformado en frío/forjado en frío, es un proceso para chapa metálica, en el que la pieza de trabajo se deforma plásticamente con un herramental mediante una prensa a temperatura ambiente). Para los procesos de conformado metálico, implica un gran reto la predicción y el control de la recuperación elástica que tiene el material una vez es retirada la carga; ya que no solo depende de los parámetros del proceso mismo, sino también de las características inherentes al material y su procesamiento como materia prima. Minimizar la recuperación de los materiales es uno de los problemas complejos en el diseño de la matrices y gran preocupación para los diseñadores de herramientas, pues de no hacerlo correctamente, implicaría realizar en muchas ocasiones a costosas modificaciones en los herramientas.

El forjado, es un proceso en el que la pieza de trabajo es deformada mediante fuerzas de compresión aplicadas por medio de matrices y herramientas. Los componentes forjados en frío mantienen buenas propiedades mecánicas de resistencia a la tenacidad y son muy confiables en aplicaciones sujetas a grandes cargas cíclicas (Merklein et al., 2012). El forjado puede realizarse a temperatura ambiente (forjado en frío) o a temperaturas elevadas (forjado en caliente). El forjado en frío requiere fuerzas más grandes, debido a que la pieza de trabajo presenta mayor resistencia a ser deformado, y este debe poseer suficiente ductilidad a temperatura ambiente para someterse a la deformación necesaria sin que se agriete. Una ventaja del forjado en frío es el endurecimiento del material

por deformación, por lo que se incrementa su resistencia. Es una operación de conformado metálico que es utilizado para deformar laminas o placas, que involucran estiramientos y adelgazamientos del metal. La velocidad de formación y la fricción también son factores adicionales que afectan al desempeño del formado de metales.

1.1. ANTECEDENTES

Martin Sprocket & Gear, Inc. es una compañía fundada en 1951 por Joe Martin Sr. Perteneciente al ramo metalmecánico de origen estadounidense, se especializa en la fabricación de máquinas para el transporte y manejo de materiales a granel para las industrias alimenticia, minera y agropecuaria principalmente. Cuenta con 31 plantas en Estados Unidos, 3 en México, Canadá, Brasil, Reino Unido y China con 1 respectivamente (Transportadores Helicoidales, 2023).

La compañía es miembro de la Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores (CEMA) creada en 1933, la cual es responsable del desarrollo de estándares para la fabricación de equipos de manejo y transporte de materiales a granel, CEMA está compuesta por los principales fabricantes de transportadores y sistemas de transporte de América. Su objetivo es promover los intereses comunes de los miembros de la industria de transportadores, con la normalización de los estándares para el diseño, la seguridad, la fabricación, aplicación e instalación en campo. También promueve el intercambio de información entre los fabricantes de transportadores, mediante publicaciones (Screw Conveyors for Bulk Materials, 2015).

Transportadores hlicoidales

Dentro de la diversidad de equipos para manejo de materias a granel que Martin Sprocket & Gear, Inc. ofrece al mercado y es especialista, son los del tipo helicoidal.

En la Figura 1 se muestra el concepto del transportador helicoidal que como tal fue diseñado por el matemático, físico e inventor griego Arquímedes (287 hasta 212

A.C). Con el objetivo de extraer agua de la bodega de un barco construido para el rey Hierón de Siracusa. Debido al éxito de esta idea posteriormente este mecanismo fue empleado para el riego de tierras para cultivo.



Figura 1. Esquema del transportador helicoidal inventado por Arquímedes.
(Transportadores de Tornillo, Bega, México)

Los transportadores helicoidales, también conocidos como transportadores de tornillo sin fin, son dispositivos mecánicos utilizados en una amplia gama de industrias para mover materiales a granel de un punto a otro de manera continua y eficiente. Su diseño se asemeja a un tornillo largo y helicoidal montado usualmente en un tubo, su versatilidad los convierte en una solución fundamental en la manipulación de materiales sólidos y semisólidos. Como puede observarse en el esquema de la figura 3, cuando el tornillo gira, su forma helicoidal actúa como un elemento de empuje del material en sentido longitudinal del transportador. Este tipo de equipos, son máquinas de transporte volumétrico, es decir, con cada revolución del tornillo helicoidal, se mueve un volumen constante de material. La velocidad de rotación del tornillo se puede variar para controlar el flujo del material en movimiento, y su diseño robusto permite un funcionamiento continuo.

Como se puede observar en la Figura 2, los transportadores de este tipo son empleados en la industria para mover una amplia variedad de materiales a granel, tales como granos, polvos, pellets, virutas, productos químicos, minerales y más.

Estos transportadores son esenciales en la agricultura para cargar y descargar granos, en la industria alimenticia para transporte de ingredientes y producto terminado, y en la minería para mover minerales y desechos. Son considerados como un medio confiable y versátil, que desempeña un papel esencial en diversas industrias. Su diseño robusto y su adaptabilidad a una amplia gama de materiales los hacen una elección valiosa en la optimización y mejora en la eficiencia de numerosos procesos industriales (Power Transmission, Material Handling & Hand Tool Manufacturer, 2022). Debido a lo mencionado presentan una gran demanda en el mercado y por ende son los principales productos fabricados por Martin Sprocket & Gear, Inc.

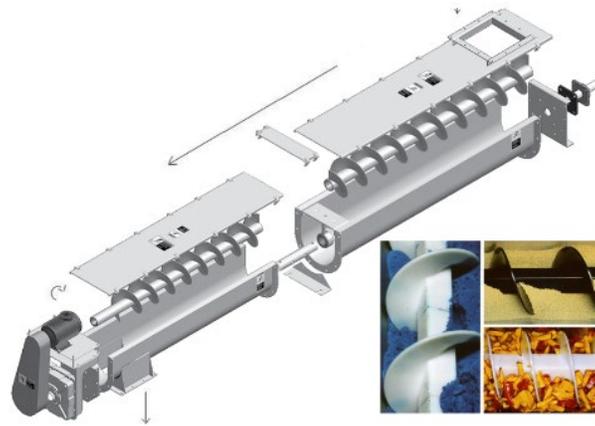


Figura 2. Transportador helicoidal, construcción general.
(Power Transmission, Material Handling & Hand Tool Manufacturer, 2022)

Seccional helicoidal

Son los elementos rotatorios principales de empuje con forma de hélice helicoidal, usualmente son fijados en el tubo por medio de soldadura, son fabricados de láminas y placas de distintos tipos de aceros al carbón, aceros aleados de mediana y alta resistencia cuando se requiere resistencia al desgaste, y aceros inoxidables para aplicaciones donde se busca mejorar la resistencia a la degradación por oxidación, pero también pueden estar hechos de materiales plásticos para aplicaciones en las que se requiere mover material para grado alimenticio.

Las características geométricas de estos elementos están relacionadas directamente con el volumen de material que se pretende mover y con el tamaño

de partícula de este, por lo tanto, existe una gran diversidad ellos, debido a esto, para su caracterización geométrica se han establecido diversos parámetros dimensionales estándar establecidos por CEMA (Power Transmission, Material Handling & Hand Tool Manufacturer, 2022), presentados en la Figura 3 y descritos a continuación:

- 1) Diámetro exterior de seccional helicoidal.
- 2) Diámetro interior del seccional helicoidal, es equivalente al diámetro exterior del tubo donde va montado.
- 3) Paso, es la distancia entre crestas, para seccionales helicoidales estándar es equivalente al diámetro exterior, pero también son fabricados con pasos variables descritos en fracciones de sus diámetros exteriores, por ejemplo, a medio paso (paso igual su diámetro exterior multiplicado por 1/2), un tercio de paso (paso igual su diámetro exterior multiplicado por 1/3), etc.
- 4) Sentido de giro, cuando es en sentido a las manecillas del reloj se le conoce como "mano derecha", cuando el giro es opuesto al sentido de las manecillas del reloj es conocido como "mano izquierda".
- 5) Espesor, se refiere al espesor de chapa metálica utilizado, que puede ser desde láminas de calibre 12 (0.105"), calibre 10 (0.135") hasta placas con espesores de 3/16", 1/4", 5/16", 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" hasta 1" usualmente.
- 6) Material de fabricación, este tipo de hélices son fabricadas a partir de láminas o placas de diversos aceros grado estructural comúnmente el más utilizado es el ATSM A-36, como de aceros de alta resistencia al desgaste y a la abrasión, como los de la clase HARDOX 400, 450 y 500 así como los aceros AR250, AR400 y AR500, igualmente es muy común el empleo de aceros inoxidable de la serie 300 como lo son el acero inoxidable 304 y el acero inoxidable 316.

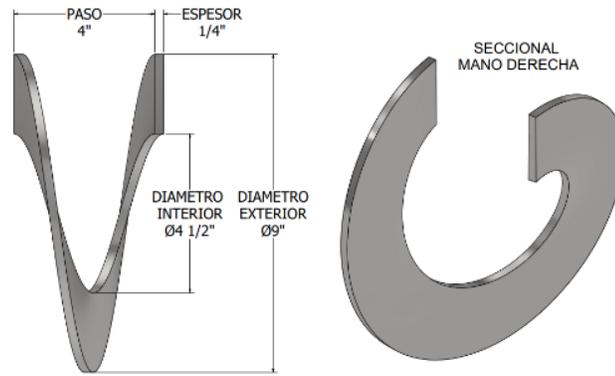


Figura 3. Dimensiones generales usados para la medición e identificación de seccionales helicoidales.
Elaboración propia

Transportadores Helicoidales intercambiadores de calor

En muchas ocasiones la aplicación para el transporte y manejo de material a granel se requiere mantener o controlar la temperatura del material ya sea para disminuirla o aumentarla, es decir, el transportador helicoidal debe funcionar como una máquina intercambiadora de calor.

Para esta aplicación, son utilizados los helicoidales seccionales de hélice hueca, como se muestra en la Figura 4, son fabricados a partir del acoplamiento hermético continuo entre dos perfiles helicoidales, uno con sección transversal recta por el lado que empuja (usualmente llamado lado de carga) el material y otro con su sección transversal cóncava por el lado opuesto, junto con el tubo, tal se realiza con cordones de soldadura continua para asegurar una buena unión y resistencia del elemento helicoidal.

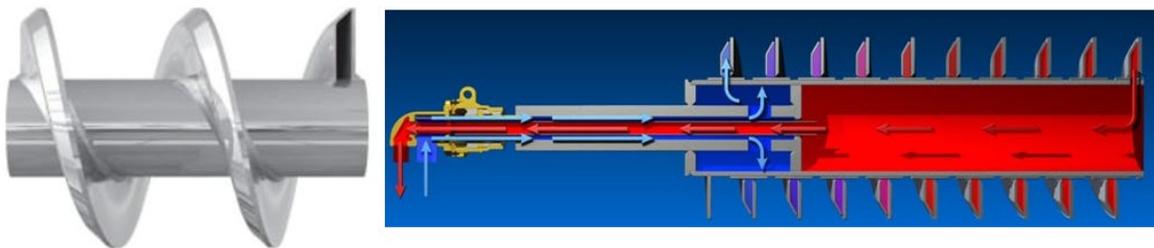


Figura 4. Los helicoidales sinfines de hélice hueca se utilizan para pasar líquidos de calefacción o refrigeración alrededor de la hélice espiral sinfín.
(Power Transmission, Material Handling & Hand Tool Manufacturer, 2022)

Tal construcción genera una cavidad por la cual es recirculado un flujo líquido o gaseoso, que modificara la temperatura del elemento helicoidal rotatorio, que al estar en contacto directo en su superficie exterior con el material que transporta, intercambiara calor por conducción (Cengel, 2007), como es presentado en la Figura 4. La rotación continua del gusano helicoidal hace que los materiales a granel se muevan y giren, aumentando la superficie de contacto con la superficie del gusano helicoidal. Como resultado, la transferencia de calor resulta muy eficiente, el transportador gira a baja velocidad, lo que permite un control y monitoreo preciso de la temperatura del material.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como fue mencionado en la sección anterior, los perfiles helicoidales con sección transversal cóncava son los componentes principales de los transportadores helicoidales de los intercambiadores de calor. Martin Sprocket & Gear, planta Toluca, tiene la capacidad de fabricar seccionales helicoidales con sección transversal recta pero no cóncava, estos últimos perfiles son fabricados en las plantas de Burleson y Arlington ubicadas en el estado de Texas, Estados Unidos. Por lo tanto, se tiene una dependencia entre plantas de estos componentes para el ensamble del transportador, esta situación genera principalmente tres grandes problemas:

1. Tiempos de entrega largos: la capacidad relacionada con la carga de trabajo que presentan las plantas en Estados Unidos es un factor que impacta directamente en los tiempos de manufactura.
2. Costos elevados: relacionados con las importaciones de los componentes (documentación y fletes).
3. Tiempo de servicio al cliente postventa: cuando se requiere hacer algún cambio de ingeniería, nuevos requerimientos o problemas en la calidad de los componentes, resulta complicado atender, debido al nulo control en los procesos de fabricación del perfil.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Martin Sprocket & Gear, Planta Toluca, cuenta la infraestructura (recursos de materia prima, maquinaria, prensas para conformado de láminas y placas de acero, software de diseño) para el desarrollo y fabricación de herramientas que permitirían el conformado en frío de seccionales helicoidales de sección transversal cóncava. Es posible la generación de manufactura con un alto valor agregado, debido a que se tendría la capacidad de fabricar estos componentes primarios para los transportadores intercambiadores de calor, con los siguientes beneficios:

1. Disminución en la dependencia que actualmente existe de las plantas ubicadas en Texas, USA.
2. Reducción en los tiempos de respuesta al cliente cuando se requieren cambios en las especificaciones técnicas, ya sea en las características geométricas de los componentes e incluso para cambios en los materiales de fabricación.
3. Mayor control en el proceso de manufactura es posible detectar de manera temprana en la fabricación alguna característica fuera de especificación, esto disminuye los retrabajos que se tengan que realizar en las áreas de armado y soldadura.
4. Se contribuye con el crecimiento del desarrollo tecnológico y de innovación en las áreas de conformado y doblez de chapa metálica de la planta en Toluca. Ya que actualmente no se cuenta con la experiencia y conocimiento técnico para la fabricación de estos componentes, es necesario generar el conocimiento mínimo para el desarrollo de productos nuevos, sentar el precedente como base para la fabricación y documentación necesaria para que el proceso se realice y sea reproducible.

Una pieza conformada correctamente, presenta nulos defectos inherentes al proceso, tales como; dimensiones fuera de especificaciones o fracturas que comprometan su funcionamiento, esto mejora la calidad y eficiencia del producto final.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Validar el proceso de conformado por pasos a través de la simulación numérica del efecto de recuperación elástica (springback) mediante análisis de elemento finito (FEM) en el proceso de conformado en frío de un perfil helicoidal de sección transversal cóncava, fabricado de placa de acero inoxidable 304.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Diseñar los herramientas prototipo con el software CAD para conformar un perfil helicoidal con sección transversal cóncava, fabricado a partir de placa de acero inoxidable 304, de ¼" (6.35mm) de espesor.
2. Realizar la simulación numérica en ANSYS Workbench con base en el método de elemento finito (MEF), con el cual sea posible predecir el efecto de la recuperación elástica (springback, SB), así como obtención de los esfuerzos y deformaciones generados.
3. Analizar dimensionalmente entre el perfil deformado virtualmente con el modelado en 3D mediante software de diseño CAD y el obtenido mediante pruebas físicas experimentales.
4. Validar la efectividad del herramental prototipo para el conformado del perfil de chapa metálica con el método propuesto.

1.5. HIPÓTESIS

La simulación numérica del proceso de conformado en frío mediante análisis de elementos finitos (FEM) permitirá la predicción del efecto de la recuperación elástica o springback (SB). Los resultados de este análisis serán relevantes para la obtención de la pieza final, así como será posible la fabricación de herramientas prototipo para conformado del perfil de acero 304 que cumpla con las tolerancias geométricas del ángulo de doblez transversal de $\pm 1^\circ$ respecto al plano vertical, así

como del paso de 4" (6.35mm) de +3/8" (9.52mm) y -1/4" (6.35mm), establecidas en los estándares de CEMA (Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores).

2. MARCO TEÓRICO

El proceso de doblado, conformado de placas y láminas de acero, es uno de los más empleados en la industria para la fabricación de piezas en altos volúmenes de producción (Garcia-Romeu & Ciurana, 2005), (Avemann et al., 2014).

Los métodos para el conformado suelen ser procesos de fabricación complejos, debido a los grandes esfuerzos y deformaciones involucradas en los materiales procesados. En consecuencia, el diseño de los herramientas para las aplicaciones de chapa metálica depende del análisis y modelado preciso del comportamiento de la placa del material que se pretende deformar (Mori et al., 2007). Aunque el diseño del herramental está relacionado directamente con la geometría del producto, la forma final de la pieza también depende del grado de recuperación elástica del material conformado (Gardner & Yun, 2018), (Suchy, 2006).

2.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS

Las propiedades mecánicas de los aceros determinan su comportamiento cuando se le aplican esfuerzos mecánicos. Es fundamental en la fase de diseño del producto conocer estas propiedades inherentes a cada tipo de material. Para fines prácticos, lo que se busca en la mayoría de las aplicaciones, es que el producto resista un esfuerzo máximo con el cual su deformación geométrica permanezca dentro de un rango permitido. Esta capacidad depende de las propiedades tales como el módulo de elasticidad del material y de su capacidad para resistir la deformación.

Existen tres tipos de esfuerzos estáticos a los que se sujetan los materiales: tensión, compresión y cortante. Los esfuerzos de tensión tienden a estirar el material, los de compresión a comprimirlo y los cortantes comprenden tensiones que tienden a ocasionar que porciones adyacentes del material se deslicen un respecto a otra. La curva esfuerzo – deformación es la relación básica que describe las propiedades mecánicas de los tres tipos (Groover, 2007).

2.1.1. Curva esfuerzo – deformación

Según (Mott & Navarro Salas, 2009) "Esfuerzo es la resistencia interna ofrecida por una unidad de área del material del cual está hecho un miembro a una carga externamente aplicada".

El esfuerzo de ingeniería en cualquier punto de la curva mostrada en la Figura 6, se define con la Ecuación 1, como la fuerza dividida entre el área original;

$$\sigma_e = F / A_0$$

Ecuación 1. Esfuerzo de ingeniería en MPa o lb/in².

Donde F = fuerza aplicada, N o lb, y A₀ = área transversal, mm² o in². El área de la sección transversal del elemento que soporta la carga se considera perpendicular a la línea de acción de la fuerza.

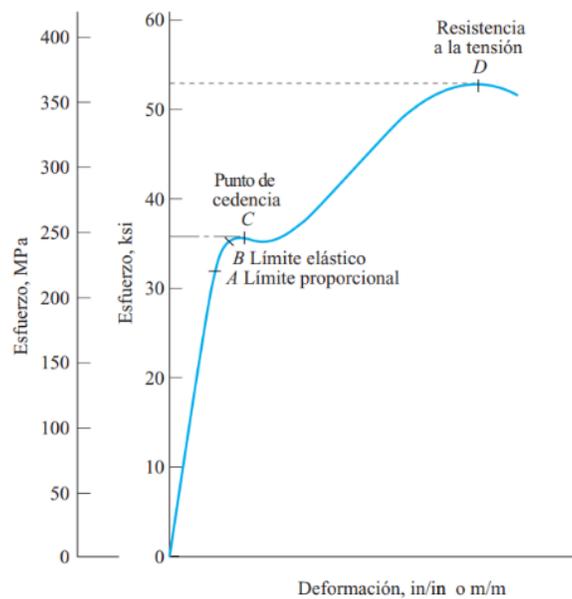


Figura 5. Curva esfuerzo – deformación típica para el acero.
(Mott & Navarro Salas, 2009)

Se puede observar en la Figura 6 que, durante la primera fase del proceso de carga, tal relación se comporta de manera lineal, lo que indica que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Hasta este punto se dice que el material tiene un "comportamiento elástico lineal". Después del punto A la

deformación deja de comportarse de forma lineal, este punto se llama "límite proporcional". A medida que se va incrementando la carga de forma continua, se llega a un punto llamado "límite elástico", marcado como *B*, con esfuerzos por debajo de este límite el material podrá recobrar su tamaño y forma original una vez retirada la carga. Con esfuerzos mayores, el material sufrirá deformaciones permanentes, a esto se le conoce como "deformación plástica". El punto de cedencia o "límite elástico" es el esfuerzo con el cual se produce un alargamiento notable del material sin un incremento aparente en la carga. El punto de cedencia se encuentra en *C* en el que si se aplican cargas mayores la curva sube de nuevo. Una vez alcanzado un pico en *D* se le conoce como "resistencia a la tensión", la curva cae y el material llegará a su falla (ruptura) (Mott & Navarro Salas, 2009).

El hecho de que la curva esfuerzo-deformación caiga después de alcanzar su resistencia a la tensión, el punto *D*, nos podría indicar que el nivel de esfuerzo al cual está sometido el material se reduce. En realidad, no lo hace, el esfuerzo verdadero continúa elevándose hasta la falla del material, la razón de la aparente reducción del esfuerzo es debido a la naturaleza del método (técnica) de obtención de la curva, el cual es mediante una máquina de ensayo de tensión típica, donde es sujeta por los extremos una probeta del material. Cuando la probeta se aproxima a su carga de ruptura, se reduce el diámetro transversal y por ende su área en la zona de falla. El área reducida requiere una fuerza menor para que la probeta siga alargándose, aun cuando el esfuerzo en el material se esté incrementando. Debido a que es muy difícil monitorear la disminución en el diámetro y la experimentación ha demostrado que hay poca diferencia entre el esfuerzo máximo verdadero y el encontrado a partir de la curva, el valor en el pico de la misma es aceptado como la resistencia a la tensión del material.

2.1.2. Ley de Hooke

Como se mencionó en la sección anterior, el diagrama de la Figura 6, presenta una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación dentro de una región elástica. Esto

se puede interpretar como el incremento en el esfuerzo ocasiona un aumento proporcional en la deformación. Esta relación está definida por la Ley de Hooke:

$$\sigma_e = E\epsilon$$

Ecuación 2. Ley de Hooke.

La rigidez de un material es una función de su módulo de elasticidad. Donde E = es el módulo de elasticidad, Pa o lb/in², o módulo de Young, ϵ = límite de proporcionalidad ($\Delta l/l$) y es inherente a cada material. La Ecuación 2, representa la porción recta inicial del diagrama esfuerzo – deformación hasta el límite de proporcionalidad. Por otra parte, el módulo de elasticidad representa la pendiente de esa recta (Russell C. Hibbeler, 2011). Por lo tanto, podemos deducir que, como se muestra en la Figura 7, un material que presenta una pendiente más pronunciada en su curva esfuerzo – deformación, será más rígido y se deformará menos bajo carga en comparación a uno con pendiente menos pronunciada (Russell C. Hibbeler, 2011), en contraste a ello, si se comparara el acero y el magnesio.

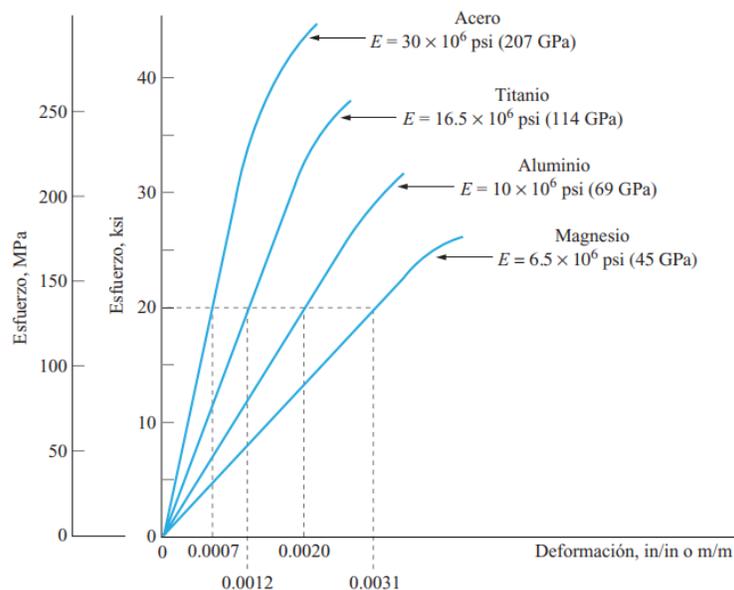


Figura 6. Módulo de elasticidad de diferentes metales.
(Mott & Navarro Salas, 2009)

“Cuando el nivel de esfuerzo en un material bajo carga está por debajo del límite proporcional y existe una relación de línea recta entre esfuerzo y deformación, se dice que la ley de Hooke es válida” (Russell C. Hibbeler, 2011).

El módulo de elasticidad es una de las propiedades mecánicas más importantes, utilizadas para su aplicación en las ecuaciones de la mecánica de materiales, sin embargo, se debe tomar en cuenta que solo es posible utilizarlo cuando se analiza el material en el estado de comportamiento elástico lineal, debido a que, si la tensión en el material es mayor a su límite de proporcionalidad, la curva esfuerzo-deformación deja de tener un comportamiento lineal y tal valor ya no podría ser válido.

También se debe tomar en consideración que la Ecuación 2, es válida únicamente donde la deformación ocurre en solo una dirección. Esto se llama *deformación uniaxial* y se aplica a miembros sometidos a tensión o compresión axial, cuando los esfuerzos ocurren en dos direcciones (*esfuerzo biaxial*), se deberá considerar el efecto adicional del segundo esfuerzo.

2.1.3. Razón de Poisson (ν)

Cuando un cuerpo deformable se somete a una fuerza de tensión axial, no solo se alarga, sino también se contrae de manera lateral. Del mismo modo, una fuerza de compresión que actúa sobre un cuerpo provoca que se contraiga en la dirección de la fuerza y que sus lados se expandan. La razón de Poisson (ν) dada por la Ecuación 3, se define como la cantidad de deformación lateral (ϵ_{lat}) entre la deformación axial (ϵ_{long});

$$\nu = - \epsilon_{lat} / \epsilon_{long}$$

Ecuación 3. Razón de Poisson.

A principios del siglo XIX, el científico francés S.D. Poisson se dio cuenta que, dentro del rango elástico, la razón de estas deformaciones es una constante (ν), y tiene un valor numérico para cada material (ver Tabla 1), siempre y cuando sea

homogéneo e isotrópico (mismas propiedades en todas direcciones). El signo negativo en la Ecuación 3, es debido a que la elongación longitudinal (deformación positiva), ocasiona una contracción lateral (deformación negativa), y viceversa. Esto considerando que, estas deformaciones son causadas por la fuerza axial o longitudinal, ninguna fuerza actúa en una dirección lateral para deformar el material en esa dirección.

Tabla 1. Valores aproximados del coeficiente de Poisson para varios materiales.

Concreto	0,10 - 0,25	Aluminio (la mayoría de las aleaciones)	0,33
Vidrio	0,24	Cobre	0,33
Hierro dúctil	0,27	Latón	0,33
Hierro fundido gris	0,21	Zinc	0,33
Plástico	0,20 - 0,40	Bronce al fósforo	0,35
Acero al carbón y de aleación	0,29	Magnesio	0,35
Acero inoxidable	0,3	Plomo	0,43
Titanio	0,3	Hule, elastómeros	0,5

(Mott & Navarro Salas, 2009)

La razón de Poisson es una magnitud adimensional y para la mayoría de los sólidos no porosos tiene un valor que se encuentra entre 0.25 y 0.333. Para un material "ideal" que no tiene deformación lateral cuando se estira o se comprime, la razón de Poisson será igual a 0. Está demostrado que el máximo valor posible para este coeficiente es de 0.5, por lo tanto $0 \leq \nu \leq 0.5$ (Russell C. Hibbeler, 2011).

2.1.4. Ductilidad, fragilidad y porcentaje de elongación

La falla por fractura de los metales se puede clasificar como consecuencia de su propiedad dúctil o frágil. Un material dúctil se alargará, cederá antes de fracturarse, en la sección fracturada el área transversal se reducirá notablemente.

A la inversa, un material frágil se fracturará de repente con poco o ningún cambio en la en el área transversal de la sección fracturada. Los materiales dúctiles se

prefieren para piezas que soportan cargas repetidas o que se someten a cargas de impacto, porque en general son más resistentes a exigencias de fatiga, debido que absorben mejor la energía de impacto.

La ductilidad es el grado en el cual un material se deformará antes de su fractura final. La medida usual para cuantificar tal grado es el porcentaje de elongación o alargamiento del material cuando se fractura en una prueba normalizada de tensión. El porcentaje de elongación se obtiene calculando la diferencia entre la longitud final y la longitud original, dividida entre la longitud original y convertida en porcentaje, esto es:

$$\text{Porcentaje de elongación} = \frac{\text{Longitud final} - \text{Longitud inicial}}{\text{Longitud inicial}} \times 100\%$$

Ecuación 4. Porcentaje de elongación de los materiales.

Desde el punto de vista teórico, se considera que un material es dúctil si su porcentaje de alargamiento es mayor al 5% (Kalpakjian, 2008).

2.2. RECUPERACIÓN ELÁSTICA, SPRINGBACK

El "springback (SB)" es un fenómeno que se observa en la deformación de materiales elásticos o plásticos cuando se someten a una carga o fuerza y luego se libera esa carga. Se refiere al hecho de que, después de deformar un material, al retirar la fuerza que lo deformó, el material tiende a recuperar parte de su forma original. En otras palabras, el material rebota o "regresa" parcialmente a su posición inicial.

La teoría detrás del springback se basa en las propiedades mecánicas de los materiales, en particular en su comportamiento elástico y plástico. Con base en lo abordado en los capítulos anteriores, se puede dar una explicación más detallada:

1. Elasticidad: Los materiales elásticos tienen la capacidad de deformarse bajo una carga y luego volver a su forma original cuando se retira la carga. Esta capacidad se debe a la estructura interna del material y su capacidad para almacenar y liberar energía elástica.
2. Plastificación: Cuando se aplica una carga suficientemente grande a un material, puede entrar en un estado plástico, donde la deformación se vuelve permanente. Esto significa que, aunque se retire la carga, el material no regresará completamente a su forma original.
3. Recuperación elástica: Después de retirar la carga, el material elástico experimenta una recuperación elástica, lo que significa que comienza a regresar a su forma original debido a la liberación de la energía elástica almacenada durante la deformación. Sin embargo, debido a que parte de la energía se ha utilizado para la plastificación, el material no regresa completamente a su forma original, lo que resulta en el springback.

Se considera estado final aquel en el que la carga se ha dejado de aplicar sobre la chapa, por tanto, según (Boljanovic, 2004), el ángulo final de doblado (φ_f), después de la recuperación, es menor que el inicial (φ_i) y el radio final de doblado o conformado (R_f) es mayor que el radio en el estado de carga (R_i), esto se presenta en la Figura 8.

Hay dos maneras de determinar el springback. Una es desarrollar un modelo predictivo con el cual pueda ser medido mediante pruebas experimentales físicas, esto se explica con mayor detalle en el siguiente apartado.

Según (Wu et al., 2023), (Ma & Welo, 2021) la otra consiste en definir una magnitud con el cual se puede obtener de manera analítica. Este valor es conocido como factor de springback (K_s) se calcula usando la Ecuación 5:

$$K_s = (R_i + T/2) / R_f + T/2 = \varphi_f / \varphi_i = (180^\circ - \alpha_2) / (180^\circ - \alpha_1)$$

Ecuación 5. Factor de Springback.

Donde T = espesor del material. Es posible estimar el valor del springback en términos de la resistencia a la cedencia del material (Y_s) y de su módulo de elasticidad (E), usando la Ecuación 6:

$$R_i/R_f = 4(R_i(Y_s)/ET)^3 - 3(R_i(Y_s)/ET) + 1$$

Ecuación 6. Springback en términos de la resistencia a la cedencia del material.

El factor del springback K_s depende únicamente de la relación (R/T). Cuando el factor $K_s = 1$, indica que no hay recuperación del material, por lo tanto, cuando el factor $K_s = 0$, indica que el material se recupera completamente (Boljanovic, 2004).

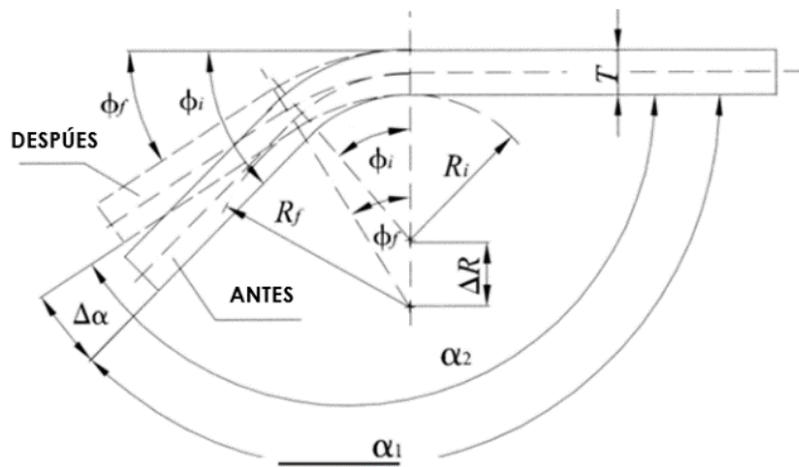


Figura 7. Recuperación o Springback, durante el proceso de doblado o conformado. (Boljanovic, 2004)

La teoría detrás del springback implica el análisis de las propiedades mecánicas y la respuesta del material a las cargas. Los ingenieros y científicos estudian este fenómeno para comprender cómo afecta a la fabricación y el diseño de componentes y estructuras (Garcia-Romeu & Ciurana, 2005), (Ma & Welo, 2021).

En resumen, la teoría del springback se basa en los principios de la elasticidad y la plastificación de los materiales metálicos y es esencial para la fabricación de piezas precisas en la industria de la metalurgia y el conformado de metales. Hoy en día son utilizados métodos como la simulación por computadora (Pérez Martínez & Medellín-Castillo, 2019) y pruebas de laboratorio para predecir y controlar el

springback en aplicaciones prácticas para la industria de la fabricación de piezas metálicas.

2.2.1 Compensación de la recuperación elástica (springback).

Aunque se pretenda eliminar la recuperación elástica del material (hito que no es posible, debido a que después de retirar la carga ejercida sobre el material siempre se presentara un grado de recuperación, aunque sea considerado mínimo despreciable), como se ha mencionado anteriormente, lo que suele realizarse en la práctica es mediante diversas técnicas. Tales, son descritas en (Garcia-Romeu & Ciurana, 2005) y se presentan a manera de resumen a continuación:

1. *Sobre doblar*, es una técnica experimental muy común en la industria, que consiste en realizar un doblado mayor al deseado para obtener el grado de recuperación que presenta el componente después de aplicada la carga, es un método iterativo en el cual se deben considerar componentes extra que servirán como pruebas para poder realizar una compensación para el resto (Pimentel et al., 2023).
2. *Acuñar la región a doblar o conformar por sujeción*, se busca que los esfuerzos producidos por la compresión al material queden altamente localizados entre la superficie del herramental macho y la hembra asegurando una deformación plástica, Figura 9. Se debe tener mucha precaución a realizar este tipo de prácticas, debido a que las maquinas prensadoras ejercen presiones muy elevadas, por lo que es importante controlar el adelgazamiento excesivo del material, lo que podría causar fallo de la pieza o daños en los herramientas de trabajo.

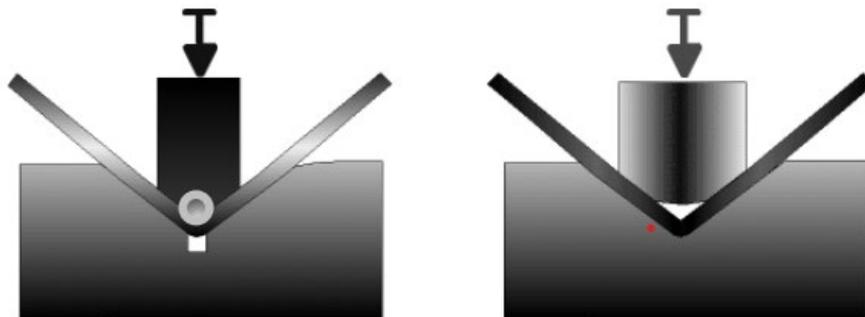


Figura 8. Método de Acuñado para compensación del SB.
(Kalpakjian, 2008)

3. *Re- golpear (restriking)*, la pieza de trabajo se somete a un doble ciclo o más, con el objetivo de ir reduciendo su recuperación hasta niveles más bajos, es una técnica considerada igual de efectiva que el sobre doblado.
4. *Doblado doble (doubled- bend technique)*, la recuperación de un doblado puede utilizarse a favor para compensar aquella que se produce en otro posterior, como se muestra en la Figura 10.

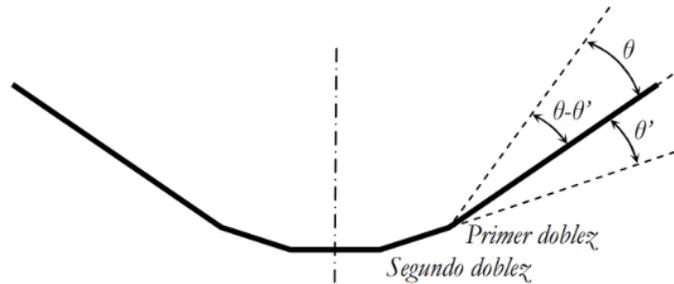


Figura 9. Técnica de doble doblado (doubled- bend technique) para compensación del SB.
(Kalpakjian, 2008)

En resumen, la compensación práctica del springback es un proceso integral en la fabricación de piezas metálicas que implica ajustar el diseño de la pieza, las herramientas, las matrices, controlar la fuerza aplicada para lograr las dimensiones y la forma deseada (Tekiner, 2004). Esto permite que las piezas sean más precisas y cumplan con las especificaciones requeridas.

2.3. SUPERFICIES APAREADAS

Cuando se presionan entre sí dos superficies con una carga, su área aparente de contacto A_a se calcula fácilmente a partir de su geometría; sin embargo, su área real de contacto A_r , se ve afectada por las asperezas que hay en sus superficies y es más difícil determinarla con precisión. La Figura 11 muestra dos piezas en contacto. Las partes superiores de las asperezas entrarán en contacto primero con la pieza apareada y el área inicial de contacto será extremadamente pequeña. Los esfuerzos resultantes en las asperezas serán muy altos y podrían exceder con facilidad la resistencia a la fluencia por compresión del material. Conforme se incrementa la fuerza de apareamiento, las crestas de las asperezas ceden y se

ensanchan hasta que su área combinada sea suficiente para reducir el esfuerzo medio a un nivel sostenible, es decir, el material más débil desarrolla una resistencia a la penetración por compresión (Norton, 2011).

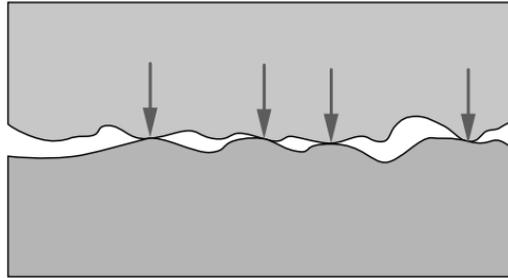


Figura 10. Representación visual del comportamiento en superficies apareadas. (Norton, 2011).

Cuando las superficies se presionan entre sí con una carga, algo de las asperezas en contacto suele adherirse de una a otra, debido a las fuerzas de atracción entre los átomos superficiales de los dos materiales. Como hay deslizamiento entre las superficies, estas adhesiones se rompen, ya sea a lo largo del punto de contacto original o a lo largo de un plano nuevo que pasa por un pico de aspereza del material. En el último caso, un trozo de la pieza A se transfiere a la pieza B, causando problemas y daño superficial (Lu et al., 2014). Algunas veces una partícula de material se romperá y quedará libre, volviéndose un residuo en el punto de contacto, lo cual podría entonces rayar la superficie y crear surcos en ambas piezas.

Se cree que, en la mayoría de los casos de contacto, sobre todo con frotamiento repetido, tan sólo una pequeña fracción de los contactos de asperezas causa realmente fluencia y adhesión; las deformaciones elásticas de las asperezas también juegan un rol significativo en las fuerzas de tracción (fricción) desarrolladas en el punto de contacto. En la Tabla 2 se muestran los valores para coeficientes de fricción para combinaciones de algunos materiales (Norton, 2011).

Tabla 2. Coeficientes de fricción para algunas combinaciones de materiales.

<i>Material 1</i>	<i>Material 2</i>	Estático		Dinámico	
		Seco	Lubricado	Seco	Lubricado
Acero dulce	Acero dulce	0,74		0,57	0,09
Acero dulce	Hierro fundido		0,183	0,23	0,133
Acero dulce	Aluminio	0,61		0,47	
Acero dulce	Latón	0,51		0,44	
Acero duro	Acero duro	0,78	0,11-0,23	0,42	0,03-0,19
Acero duro	Babbitt	0,42-0,70	0,08-0,25	0,34	0,06-0,16
Teflón	Teflón	0,04			0,04
Acero	Teflón	0,04			0,04
Hierro fundido	Hierro fundido	1,1		0,15	0,07
Hierro fundido	Bronce			0,22	0,077
Aluminio	Aluminio	1,05		1,4	

(Norton, 2011).

2.4. CONFORMADO DE CHAPA METÁLICA

El proceso de conformado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se recurre a la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un troquel, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. En general, se aplica un esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Como es mencionado en (Groover, 2007), el efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente, que es por debajo de la temperatura de recristalización. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan al desempeño del formado de metales.

El conformado en frío o forja es un proceso muy eficaz para dar forma a los perfiles de los materiales. En este proceso, una placa metálica se deforma gradualmente dentro de un herramental utilizando una prensa a temperatura ambiente. Predecir y controlar la recuperación elástica (SB, springback) durante los procesos de conformado es uno de los principales retos, ya que depende no sólo de los

parámetros del proceso de conformado, sino también de las características inherentes de la materia prima.

2.5. FORJADO

El forjado es un proceso básico en el que la pieza de trabajo se moldea mediante fuerzas de compresión aplicadas por medio de matrices y herramientas. Las partes forjadas tienen buena resistencia a la tenacidad y son muy confiables en aplicaciones críticas sujetas a grandes esfuerzos. El forjado puede realizarse a temperatura ambiente (forjado en frío) o a temperaturas elevadas (forjado en caliente). El forjado en frío requiere fuerzas más grandes, debido a que la pieza de trabajo presenta mayor resistencia a ser deformado, y este debe poseer suficiente ductilidad a temperatura ambiente para someterse a la deformación necesaria sin que se agriete (Kalpakjian, 2008). Una ventaja del forjado en frío es el endurecimiento del material por deformación, por lo que se incrementa su resistencia (Yu et al., 2019). Es una operación de formado que es utilizado para deformar laminas o placas, que involucran estiramientos y adelgazamientos del metal. Los troqueles de estampado poseen contornos y cavidades que coinciden, el dado macho es fabricado con superficies positivas y el dado hembra con superficies negativas, como se observa en la Figura 12.

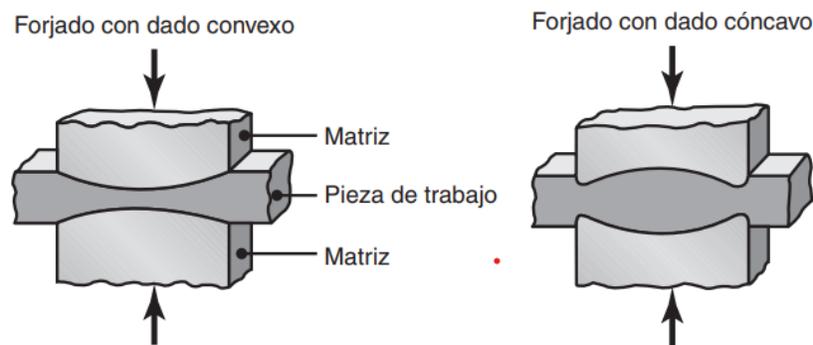


Figura 11. Esquema del proceso de conformado por estampado.
(Kalpakjian, 2008)

La complejidad de la deformación durante el proceso de forjado, hace que la estimación de la fuerza necesaria para realizar esta operación sea difícil, en comparación con los problemas que solo involucran deformaciones uniaxiales.

Según (Beddoes & Bibby, 1999), la deformación media aproximada (ϵ_{av}), puede estimarse de acuerdo con la Ecuación 7:

$$\epsilon_{av} = \ln (h_o/h_m) = \ln (h_o A_p / V)$$

Ecuación 7. Deformación media aproximada.

Donde h_o = altura inicial promedio del material, h_m = altura final promedio del material, V = volumen del material y A_p = es el área proyectada de la pieza deformada, el área proyectada es el área plana entre la matriz y la pieza deformada, incluyendo la rebaba (Beddoes & Bibby, 1999).

Según (Kalpakjian, 2008), la fuerza de forjado (F) requerida para efectuar una operación con matriz de impresión, se puede calcular a partir de la Ecuación 8:

$$F = k Y_f A_p$$

Ecuación 8. Fuerza de forjado.

Donde k = es un factor multiplicador que se obtiene de la Tabla 3, Y_f = es el esfuerzo de flujo del material a la temperatura de forjado y A_p = es el área proyectada de la pieza forjada, incluyendo la rebaba.

Tabla 3. Factores de multiplicación para el cálculo de la fuerza de forjado.

Factores k	
Formas simples, sin rebaba	3-5
Formas simples, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

(Kalpakjian, 2008) y (Beddoes & Bibby, 1999)

Muchas operaciones de conformado implican someter a las piezas de trabajo a una serie de esfuerzos combinados, como es la flexión, tensión y cortante. Por tanto, el análisis de los procesos de manufactura para geometrías complejas resulta ser muy difícil, debido al cambio en su geometría respecto al tiempo. Aunque en las secciones anteriores se han mostrado las ecuaciones que nos ayudan a estimar

ciertos comportamientos, no proporcionan soluciones precisas para muchas aplicaciones a nivel industrial. Estos principios, combinados con un buen criterio de ingeniería, pueden aportar conclusiones útiles (Praveen et al., 2020).

Debido a esto, la aplicación del análisis debe incluir pruebas de conformabilidad en laboratorio y optimización informática para mayor severidad del diseño.

2.6. ACERO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS HERRAMENTALES

El material de la herramienta debe ser seleccionado cuidadosamente tomando en consideración las siguientes características:

- Composición química para evaluar la posibilidad de incrementar su resistencia después del mecanizado mediante la aplicación de tratamiento térmico y su comportamiento en este proceso, es decir, se debe considerar que para los aceros podrían tenerse alteraciones geométricas importantes después del tratamiento térmico. Cualquier deformación mayor producida afectará al producto final, los aceros menos estables requieren diseños más conservadores para soportar la tensión que se genera con el tratamiento, esto afecta de manera significativa la resistencia del herramental e incrementa la probabilidad de falla por fatiga, si es el caso, debe considerarse un segundo tratamiento para disminuir las tensiones residuales (comúnmente es conocido como relevado de esfuerzos).
- La profundidad del endurecimiento superficial y la resistencia del material también son aspectos importantes para la selección adecuada.
- Naturalmente la maquinabilidad del material es esencial, debido a que una herramienta fabricada de un material difícil de maquinar requiere procesos más caros en comparación con el de uno fabricado de un material con buena maquinabilidad.
- La resistencia al desgaste es otra característica importante, esta propiedad está relacionada directamente con el tiempo de vida útil del herramental, se busca que sea el mayor posible.

- La tenacidad es otra propiedad que debe ser considerada en la elección de un material (acero), es la capacidad para resistir cargas sin que se produzcan deformaciones o fallas. Es decir, el valor del límite elástico del material es importante en esta evaluación, lo que se busca es que las herramientas de conformado deban ser rígidas, no ceder plásticamente y evitar condiciones de fallas por fractura.
- Acero al medio carbono, su contenido de carbono es cercano al 0.40%, es utilizado en aplicaciones que requieren una resistencia mayor que los aceros al bajo carbono (contenido de carbono menor al 0.20%). Es utilizado para la fabricación de componentes para maquinaria.
- Cromo (Cr), mejora la dureza del acero al igual que su resistencia al desgaste. Es uno de los elementos de aleación más eficaces para incrementar la templabilidad. En proporciones significativas el cromo mejora la resistencia a la corrosión.
- Molibdeno (Mo), incrementa la tenacidad y dureza en caliente. También mejora la templabilidad y forma carburos que dan resistencia al desgaste.

Usualmente, los materiales para matrices y herramental se endurecen de 55 a 65 HRC para trabajado en frío, y de 30 a 55 HRC para trabajado en caliente. Los aceros para matrices y herramental contienen uno o más de los siguientes elementos principales de aleación: cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio (Kalpakjian, 2008).

2.7. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

El software para diseño asistido por computadora CAD (*Computed Aided Desing* o Diseño Asistido por Ordenador) permite desarrollar modelos tridimensionales (3-D) a partir de los cuales pueden obtenerse vistas ortográficas convencionales en dos dimensiones con acotamiento automático. El entorno donde será instalado el componente diseñado incluso puede ser integrado, a su vez, todos los elementos pueden ser almacenados en una base de datos para la creación de prototipos. Las ventajas de este tipo de software para modelado, es que es posible realizar cálculos rápidos y con un nivel de exactitud alto de las propiedades de los

elementos, como son el centro de gravedad, momentos de inercia de masa, áreas, volúmenes, pesos y dimensiones.

El CAD puede considerarse como un subconjunto del CAE (*Computer Aided Engineering* o Ingeniería Asistida por Ordenador). Algunos paquetes de diseño realizan análisis de ingeniería específicos y/o tareas de simulación que ayudan al diseñador, pero no se consideran una herramienta para la creación del modelo como lo es el CAD, por tal motivo, el diseñador hace uso de ambas herramientas de manera simultánea en el proceso de desarrollo de un producto.

En la actualidad, la implementación de simulaciones para la predicción del comportamiento de metales en el proceso de conformado por deformación es fundamental para la validación de los herramientas, porque su uso aporta de manera significativa a la reducción anticipada de problemas derivados de este tipo de procesos. Simular cualquier fenómeno en un proceso de fabricación de chapa metálica, es elaborar una representación del proceso por medio de un modelo computacional matemático que permita un análisis más rápido y económico, en comparación a la realización de pruebas físicas. Esta herramienta perteneciente al sistema CAE es utilizada para la optimización como parte del proceso de desarrollo del producto. El objetivo de este análisis computacional como herramienta de simulación de chapa metálica es la obtención de un modelo que represente el fenómeno de manera virtual con un nivel de correlación alto, es decir, la predicción del fenómeno físico de deformación del material y esfuerzos (principalmente), cuya interpretación de los resultados nos den certeza que el modelo simulado cumplió con los requerimientos específicos planteados (Tekkaya, 2000):

1. *Procesos y operaciones.* Se espera que la herramienta de simulación sea capaz de modelar el proceso y la serie de operaciones que intervienen en el conformado.
2. *Facilidad de uso.* La industria espera que el uso de la herramienta sea tan sencillo que no se tenga la necesidad de recurrir a un experto en elementos finitos. Además, la herramienta de simulación debe estar disponible donde

se requiera, es decir, debe poder utilizarse en el departamento de diseño y no solo en el departamento de análisis CAE de la empresa.

3. *Interfaz CAD-FEM-CAD*. El requerimiento ideal es que el modelo de las herramientas CAD (*Computed Aided Desing* o Diseño Asistido por Ordenador) se pueda transferir fácilmente al análisis FEM (*Finite Element Method* o Método de Elementos Finitos) y que cualquier modificación geométrica durante el proceso de simulación de FEM puedan volver a transferirse al modelo CAD y desde allí al sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing* o Fabricación Asistida por ordenador).
4. *Eficiencia de la simulación*. Dependiendo de la etapa del diseño y de la etapa de desarrollo del producto en la que se usa la herramienta CAE, se desean tiempos de análisis diferentes (tiempo de procesamiento de la información). Mientras que en las fases preliminares de diseño se requieren tiempos de respuesta cortos (primera iteración), en la fase principal de diseño o resolución de problemas se esperan tiempos de solución más largos.
5. *Resultados de la simulación*. El usuario requiere evaluar varios resultados numéricamente: distribución del grosor y deformación de la chapa, indicadores de fallo por fracturas (zonas de concentración de esfuerzos para la optimización de la geometría de la pieza), recuperación geométrica (SB, springback) y esfuerzos máximos principalmente (para la obtención del factor de seguridad).
6. *Precisión*. Con el uso de las herramientas de simulación se han aumentado los requerimientos relacionados con la precisión. Se espera una elevada precisión para la determinación de fallas. Para esto es deseable que al análisis sea incluido el factor de la fricción.

En la actualidad la mayoría de las simulaciones que se realizan para el desarrollo de herramientas, están centradas en:

- La determinación de la geometría de la herramienta.
- Considerando la geometría inicial de la pieza, la obtención virtual de la geometría final.
- Determinación de las fuerzas que provocarían la deformación.

- Validación del proceso de conformado, es decir, la elección correcta de la secuencia del proceso para deformar la pieza para evitar problemas de rasgado y arrugas.
- Validación puntual de la geometría de la pieza, es decir, distribución del grosor en las secciones trasversales, recuperación y tensiones residuales.

Se ha comprobado que con el uso de la simulación se acortan los tiempos de desarrollo, al igual que se consigue una disminución del costo de proyecto debido a que en la fase del desarrollo del producto se reducen el número de prototipos y pruebas físicas, esto lleva a que el producto final sea optimizado (Gröbel et al., 2014).

2.8. SIMULACIÓN NUMÉRICA POR FEM

Es posible el uso de simulación mediante software de análisis de elemento finito (FEM) para la predicción de efecto del springback en procesos para conformado de chapa metálica. Esto permite realizar modelos virtuales que muestren el comportamiento del material y el proceso de conformado (Badr et al., 2018).

La secuencia descrita de manera general para realización de simulaciones se describe a continuación, y se explicara con mayor detalle más adelante:

1. Preparación de la geometría: Creación de un modelo geométrico tridimensional (3D) de los sólidos que estarán en interacción. Esto incluye definir la geometría inicial de la pieza y del juego de herramientas o matrices utilizados para deformarla.
2. Definición de las propiedades del material: Se ingresan al software de simulación las propiedades mecánicas de los sólidos, tales como el módulo de Young, límite elástico, resistencia a la tracción, coeficientes de fricción, temperatura y demás factores que intervienen en el proceso. Estos datos son indispensables para generar un modelo que simule correctamente el comportamiento del material en estudio.

3. Selección de condiciones de frontera: Se establecen las condiciones físicas de interacción entre los sólidos, son establecidas las restricciones que se tienen, como pueden ser cargas localizadas o distribuidas y restricciones de movimiento. Para el modelo planteado en este trabajo serán las condiciones de interacción entre los herramientales con el componente que se pretende deformar.
4. Generación de la malla (meshing): El software realiza la división de los sólidos o estructuras en partes más pequeñas o subdominios llamadas "elementos finitos". Estos elementos son definidos por una serie de ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico de interacción entre ellos y con su entorno (Li et al., 2021). Todos los elementos finitos definen la malla, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 13.

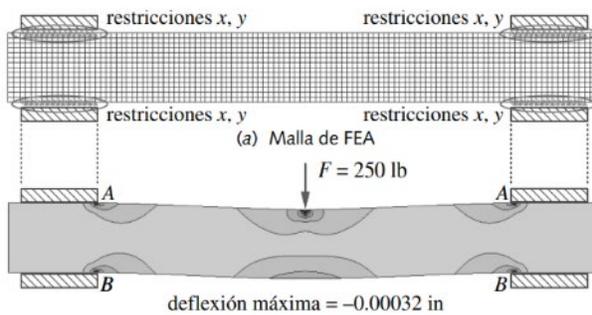


Figura 12. El modelo de FEA con condiciones de frontera fijo-fijo para la viga. (Norton, 2011)

5. Ejecución de la simulación: Es la solución grafica de las ecuaciones realizada por el software, se observa el comportamiento del material en función de las condiciones y propiedades previamente definidas.
6. Análisis de resultados: Una vez completada la simulación, lo que se obtiene es el valor de los esfuerzos y su localización, al igual que los desplazamientos en el material (deformaciones).
7. Ajustes y optimización: Si los resultados no cumplen con las especificaciones requeridas, se procede a realizar los cambios de ingeniería en las geometrías e incluso el replanteamiento de las condiciones de frontera. Una vez hecho,

se repite la simulación para verificar los cambios, es decir, este análisis es un proceso iterativo.

8. Validación experimental: Es importante realizar la validación de los resultados mediante pruebas experimentales en prototipos. Esto permite saber si el modelo simulado es fiable y el grado de correlación que se tiene respecto al proceso real. Una vez realizada la validación, se podrá garantizar la efectividad de la simulación (Ren et al., 2018), (Cybulski et al., 2014).

La simulación por elementos finitos es una herramienta poderosa que permite a los ingenieros de diseño del producto, ingenieros de diseño de herramientas y fabricantes, predecir y controlar con mayor certeza los efectos producidos en el proceso de conformado, esta información es muy útil para la optimización del proceso, diseño y desarrollo de herramientas (Miguel et al., 2013).

3. METODOLOGÍA

Según (Budynas & Nisbett, 2008) "diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema particular. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse. El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo".

Las herramientas de la ingeniería (como las matemáticas, la estadística, la computación, las gráficas y el lenguaje) se combinan para producir un plan que cuando se lleva a cabo, se crea un producto que cumpla con diversos requerimientos, cuyos requisitos de diseño y criterios de evaluación deben cumplir las siguientes características (Mott & Navarro Salas, 2009):

- *La función*, se debe especificar qué es lo que debe hacer el dispositivo (para este trabajo es el herramienta), mediante afirmaciones generales no cuantitativas, donde se usen fases de acción tales como soportar una carga y deformar un material.

- *Los parámetros de diseño* son declaraciones detalladas, en general cuantitativas de los valores esperados del funcionamiento, condiciones de frontera (medios externos, interacciones relacionadas al entorno) en las que debe trabajarse, las limitaciones de espacio, peso, materiales y componentes disponibles que puedan usarse.
- *Los criterios de evaluación* son declaraciones de características cualitativas deseables en un diseño, que ayudan al diseñador a tomar una decisión, esto es, el diseño que maximice las ventajas y minimice las desventajas (optimización).

Juntos estos elementos pueden llamarse “especificaciones para el diseño”. Es una labor compleja que requiere muchas habilidades, es necesario dividir problemas complejos en una serie de tareas simples. Las capacidades personales del diseñador en cuanto a creatividad, habilidad para comunicarse y destreza para resolver problemas están entrelazados con el conocimiento teórico y técnico.

3.1. PROCESO PARA EL DISEÑO MECÁNICO

El proceso de diseño completo, de principio a fin, puede resumirse en la figura 14 (Mott & Navarro Salas, 2009). El proceso comienza con la identificación de una necesidad, hay una diferencia notable entre el enunciado de la necesidad y la identificación del problema. La definición del problema es más específica y debe incluir todos los requerimientos del objetivo del diseño.

Las especificaciones son las entradas y salidas, características y dimensiones del espacio que el objeto debe ocupar y las limitaciones relacionadas a esto. En cambio, la necesidad, solo es la idea general para dar solución a alguna inconformidad, a menudo tal necesidad no es del todo evidente, el reconocimiento se acciona por una circunstancia adversa, o por un conjunto de circunstancias aleatorias que se originan casi de manera simultánea.

En el caso específico para el diseño de herramientas para conformado de chapa metálica, ningún trabajo de diseño puede considerarse óptimo, hasta que se cumplan los criterios de validación específicos establecidos; los especialistas y autores de libros para el diseño y desarrollo de troqueles concuerdan de manera general que tales criterios de validación deben cumplir con lo siguiente:

- Una matriz o conjunto de matrices, debe combinar la máxima capacidad de producción con el menor mantenimiento, con un periodo de vida útil alto.
- Generar un valor agregado al proceso, es decir que el diseño, desarrollo y fabricación del herramental genere costo veneficio con márgenes de utilidad altos.
- Que las prácticas de trabajo en la prensa sean más eficientes.

Cualquier modificación en el diseño debe ser analizada minuciosamente, debido a los efectos económicos, tiempos productivos (paros no programados) y defectos de calidad en el producto final que se pudieran ocasionar.



Figura 13. Pasos para el proceso de diseño mecánico.
(Smith, 1990)

El proceso general de planificación para el diseño de una nueva pieza o herramienta para conformado, de deben seguir los siguientes pasos (Smith, 1990):

1. Definir exactamente lo que el herramental debe conseguir, es decir, su aplicación específica.
2. Reducir cualquier especificación vaga o generalizada en cuanto a las especificaciones de tipo de materiales, propiedades mecánicas y dimensiones.
3. Asegurarse que las especificaciones dimensionales (tolerancias) se puedan cumplir, se tengan en cuenta los factores físicos como carrera de los elementos móviles, recuperación elástica, presión, temperatura en el proceso.

4. Establecer los límites dimensionales con referencia al montaje o fijación a la máquina de prensado. Estas consideraciones usualmente requieren modificaciones o adaptaciones en la herramienta, como barrenos, ranuras, espaciadores o fijaciones con nuevos dispositivos, es decir, averiguar si existen limitaciones en el equipo de prensado disponible, de ser el caso, se debe buscar modificar el herramental en medida de lo posible para reducir tales restricciones.
5. ¿El peso es un factor crítico?, en caso afirmativo, se debe considerar la posibilidad de reducción de peso, haciendo modificaciones en la geometría del herramental o cambiando el material.
6. Analizar los sistemas de apoyo y sujeción y zonas del herramental donde se producen los esfuerzos máximos o desgaste excesivo. Que sean capaces de resistir la deformación del material conformado.
7. Si la producción de los materiales conformados en altos volúmenes, identificar hasta qué punto las propiedades físicas de estos se alteran o hasta que nivel el herramental compromete la producción en serie.

3.2. MODELADO CAD Y CONCEPTO DE DISEÑO

Los herramientas se diseñaron considerando el proceso de forjado en frío, la propuesta consiste en la realización del proceso de conformado considerando la infraestructura y capacidad de fabricación actual, en la Figura 14 es presentado el diseño 3D de dos herramientas sólidos y el perfil helicoidal de sección transversal cóncava de chapa metálica cuyas dimensiones principales son acotadas en la Figura 15, tal fue desarrollado mediante el uso del software CAD de Autodesk Inventor Professional versión estudiantil (Autodesk, 2022).

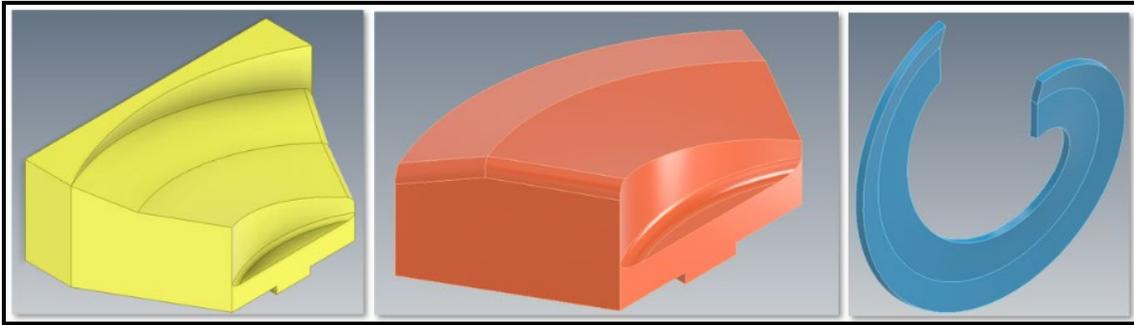


Figura 14. Modelado 3D, a) dado hembra, b) dado macho y c) seccional helicoidal curvo. Elaboración propia

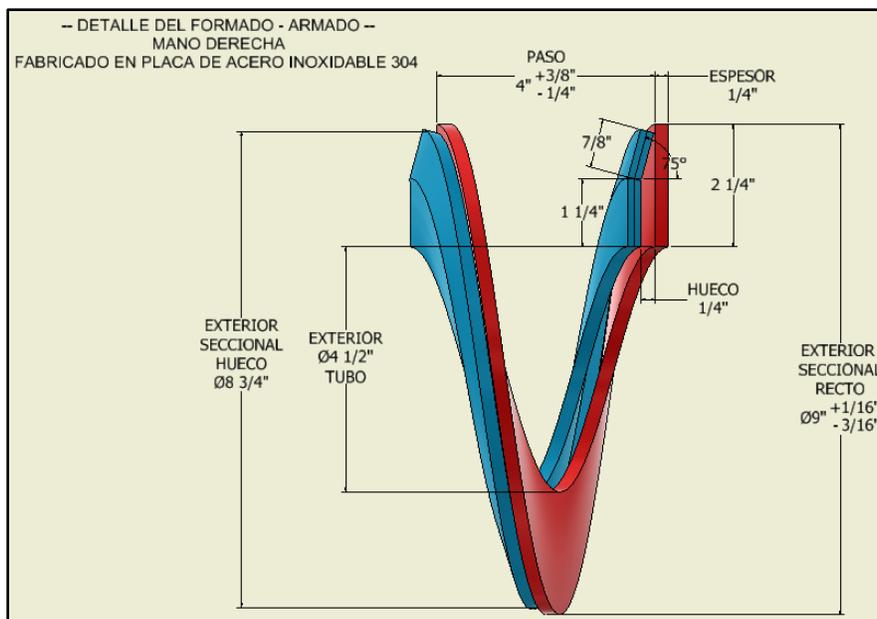


Figura 15. Dimensiones generales para el perfil helicoidal de sección transversal cóncava. Elaboración propia

Las tolerancias geométricas establecidas en los estándares de CEMA son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Tolerancias con base a estándares Martin y CEMA publicados.

TOLERANCIA DIAMETRO EXTERIOR	
Más	Menos
1/16" (1,58mm)	3/16" (4,76mm)
TOLERANCIA EN EL PASO	
Más	Menos
3/8" (9,52mm)	1/4" (6,35mm)
TOLERANCIA ÁNGULO DE DOBLEZ TRANSVERSAL	
Más	Menos
1°	1°

(EL GRAN CATALOGO 4000, Martin Sprocket & Gear)

3.3. PROTOTIPADO RÁPIDO

Como complemento posterior, se realizó la impresión 3D de los herramientas mediante el modelado por depósito fundido (FDM, Fused Deposition Modeling), utilizando un filamento de ácido poliláctico comercial estándar (PLA) cuyas propiedades mecánicas son consideradas como buenas en comparación con sus similares termoplásticos. Otra ventaja para la elección de este material es su bajo costo, tales características, cumplen con el objetivo para este prototipado rápido.

El propósito para la realización del prototipado fue identificar las adaptaciones para su montaje en una prensa hidráulica horizontal semi automática como es mostrado en la Figura 16. Tal adaptación fue descartada debido a las limitaciones en la carrera del pistón con la que cuenta esta máquina, se detectó tempranamente que no es suficiente para realizar el conformado con el uso del herramienta propuesto, esta limitante requiere modificaciones considerables para la realización del formado. Por lo que se tuvo que realizar la adaptación en una prensa vertical, la cual cuenta con menos restricciones para la incorporación de herramientas para conformado.



Figura 16 . Proceso de impresión 3D de herramientas prototipo y montaje en prensa horizontal.
Elaboración propia

3.4. MÉTODO DE CONFORMADO PROPUESTO (POR SECCIONES)

El de fabricación consiste en mantener fijo el herramental inferior (hembra) y aplicar la compresión del material hacia abajo (desplazamiento en -x) del herramental superior (macho), hasta llegar a la posición de máxima deformación de la placa, es decir acuñamiento, como fue presentado en la Figura 8 del capítulo anterior; se busca que los esfuerzos producidos por la compresión a la placa queden altamente localizados entre la superficie del herramental macho y la hembra.

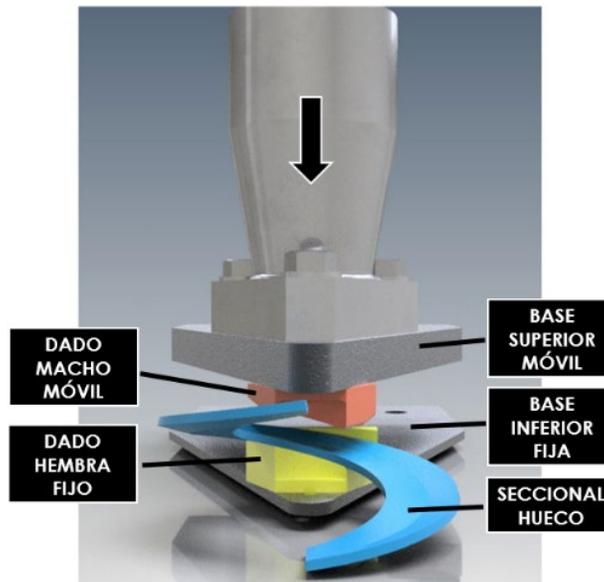


Figura 17. Concepto final modelado con el software Autodesk Inventor versión 2022.
Elaboración propia

Se propuso una sujeción mecánica mediante tornillos para ambos instrumentales, a dos bases sujetas a una prensa accionada por un cilindro en posición vertical, como se observa en la Figura 17.

El método propuesto para el conformado de la pieza consiste en deformar por secciones al mismo tiempo que se va rotando de manera manual el perfil cortado la placa metálica hasta obtener el perfil helicoidal de sección transversal cóncava. La Figura 18 se presenta la secuencia del conformado.



Figura 18. Conformado por secciones de un perfil helicoidal cóncavo en placa de acero inoxidable 304 de $\frac{1}{4}$ " de espesor.
Elaboración propia

3.5. SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL SOFTWARE ANSYS STATIC STRUCTURAL

Los modelos previamente generados en CAD fueron importados al software de simulación como es mostrado en la Figura 19, a cada sólido se les asignó las propiedades mecánicas y restricciones de geometría mencionados más adelante, se consideró la resolución del modelo mediante análisis estático estructural. El análisis que se desarrolló es de tipo plástico, debido a que el objetivo fue simular grandes deformaciones permanentes en el perfil de acero inoxidable.

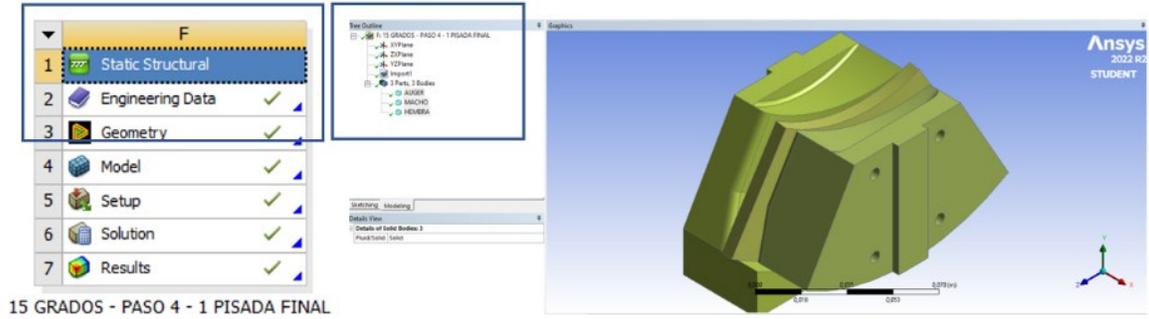


Figura 19. Importación de modelos CAD al software ANSYS.
Elaboración propia

Se realizaron las simulaciones del proceso de conformado para obtener el perfil deformado virtualmente con el efecto del SB. Para ello fue utilizado el software ANSYS Workbench versión estudiantil (ANSYS, 2022). En el modelo, los herramientales se configuraron como cuerpos rígidos de acero AISI 4140 cuyas propiedades mecánicas son mostradas en la Tabla 5, mientras que para la pieza de trabajo se consideró en acero inoxidable 304 deformable. Las propiedades mecánicas del acero inoxidable se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Propiedades mecánicas y composición química de acero AISI 4140.

Acero	Nombre del acero	Composición química						Resistencia a la tensión		Elongación, %
		Cr	Mn	Mo	P	S	Si	MPa	lb/in ²	
4140	Cromo - Molibdeno	1	0,8	0,2	0,04	0,04	0,3	918	133 000	16

(Miguel, V., Coello, J., Martínez, A., & Calatayud, A., 2013)

Tabla 6. Propiedades mecánicas y composición química de acero inoxidable 304

Tipo	Composición química				
	Fe	Cr	Ni	C	Mn
Austenítico 304	69	19	9	0,08	2
Propiedad	Valor				
E: módulo de elasticidad (Mpa)	200000				
v: Módulo de Poisson's	0,3				
Elongación (%)	39				
Sut: Resistencia última a la tensión (Mpa)	582				
K: Coeficiente de endurecimiento (Mpa)	672				
n: exponente de endurecimiento	0,1577				
ρ : densidad (Kg/m ³)	7850				

(Vargas, 2017)

Para discutir la efectividad de los herramientales para conformar el componente, fueron planteados dos escenarios. Para el primero fue considerada la aplicación de la carga para el formado de la pieza en un ciclo de compresión, con esto se conocerán los valores teóricos de los esfuerzos y la estimación de la recuperación elástica, es decir, el valor del springback. Para el segundo se consideró el formado de la pieza en dos ciclos de compresión para la comparación de los resultados, con el objetivo de determinar si al aplicar dos ciclos continuos es posible mejorar la precisión del conformado.

3.6. CONTACTOS

Como es mostrado en la Figura 20, se propusieron 3 contactos. Para las superficies de los herramientales que estarán en contacto directo con el perfil de placa, la configuración seleccionada es del tipo áspero (rough), este tipo de contacto modela un estado de fricción perfectamente rugoso, donde no hay deslizamiento.

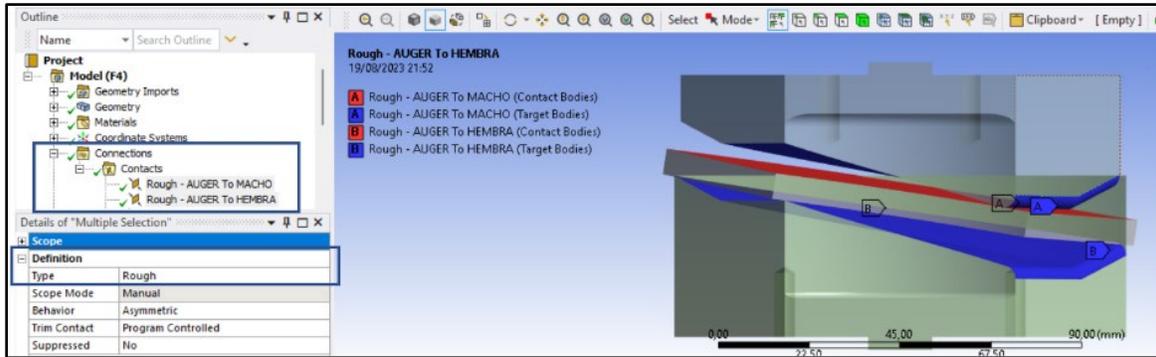


Figura 20. Configuración de los contactos del tipo áspero (rough) entre los herramientas y la pieza de trabajo.
Elaboración propia

Fue considerado un segundo tipo de contacto con fricción (frictional), como es mostrado en la Figura 21. Este comportamiento se presentará en la zona donde los cuerpos tenderán a deslizarse entre sí. Se obtiene de la tabla III el coeficiente de fricción con valor de 0.42.

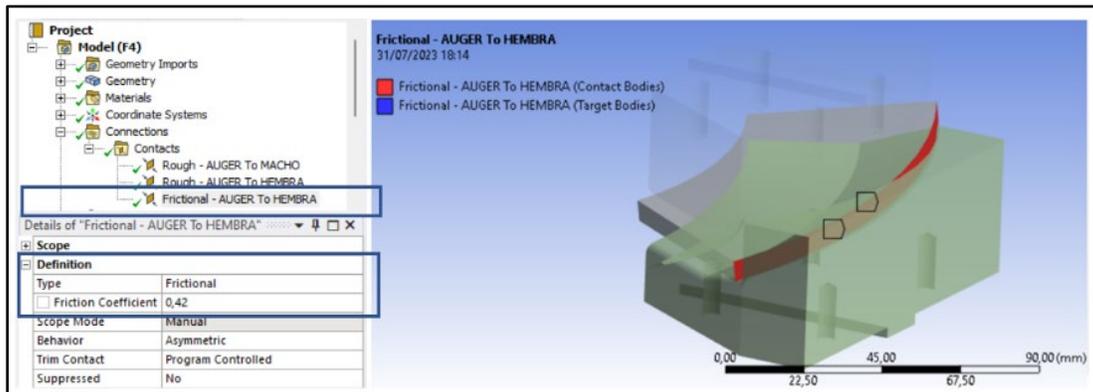


Figura 21. Configuración del contacto con fricción entre los herramientas y la pieza de trabajo.
Elaboración propia

3.7. MALLADO

Para la caracterización del mallado fue considerada la aplicación de dos mallas completamente estructuradas con elementos del tipo hexaedro.

Debido a que el análisis está enfocado principalmente a la obtención del comportamiento del perfil de chapa metálica, como es presentado en la Figura 22

el primer mallado fue aplicado únicamente a las superficies de los herramientales que están en contacto con la pieza, el tamaño de malla es de 4mm. El segundo mallado fue aplicado a todo el sólido deformable como se presenta en la Figura 23, se llegó a un tamaño de elemento de 2mm, se generaron 4058 elementos con 19788 nodos. Realizar la disminución del número de elementos totales y contribuye a reducir el tiempo de procesamiento del software para la solución del sistema.

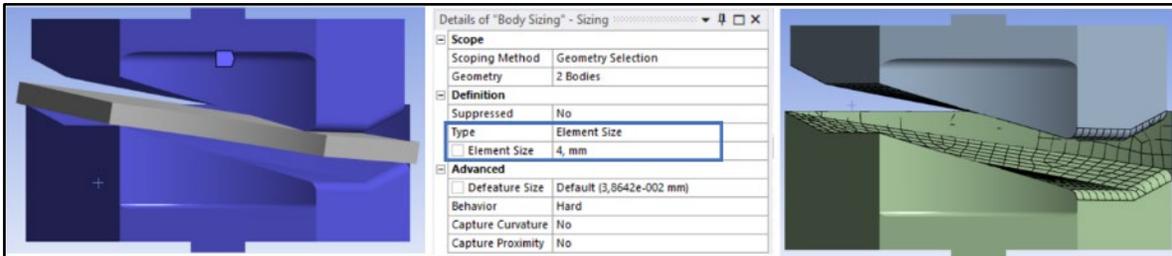


Figura 22. Tamaño de elemento de 4 mm para la malla que representa la superficie de trabajo de los herramientales.
Elaboración propia

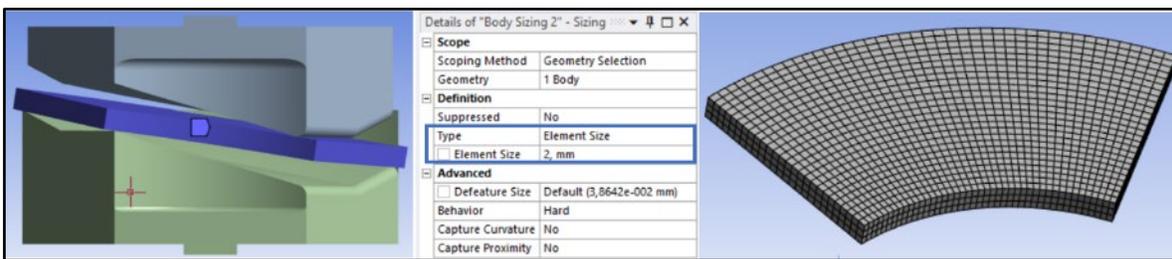


Figura 23. Tamaño de elemento de 2mm para la malla generada para el cuerpo solido antes del conformado.
Elaboración propia

Se realizaron 3 iteraciones para la optimización de los resultados, las cuales consistieron en reducir el tamaño de malla de solido deformado con el objetivo de conocer la tendencia de convergencia entre los resultados para cada iteración, tales resultados son presentados en la Tabla 7, se observa que la convergencia para los factores de seguridad queda dentro del intervalo de 1.32 a 1.42 para los tamaños de elemento de 2.5 mm y 2 mm respectivamente.

Tabla 7. Análisis de convergencia de mallas

Tamaño del elemento para el perfil deformado	Convergencia	Mallado del modelo		Esfuerzo máximo equivalente Von Mises	Deformación máxima	Factor de seguridad	
		Elementos	Nodos			Max.	Mín.
4 mm	Si	1250	5532	239 Mpa	7,94 mm	15	2.4
2.5 mm	Si	3014	14436	441 Mpa	7,7 mm	15	1.32
2 mm	Si	4058	19788	410 MPa	7,67 mm	15	1.42

Elaboración propia

3.8. DESPLAZAMIENTOS

El desplazamiento del herramental superior está restringido en las direcciones de los ejes coordenados Y & Z. La deformación del cuerpo sólido en estudio se genera debido a la presión aplicada del herramental superior (desplazamientos en -x) y manteniendo el herramental inferior fijo (estático). Esto se logró en el modelo aplicando valores de desplazamiento en dirección de -x, como ha sido mencionado, se realizó la comparación para 1 ciclo y 2 ciclos de conformado, tales resultados se discuten en la siguiente sección.

Desplazamiento primer simulación (1 ciclo).

Para el primer análisis fue aplicado un desplazamiento de $x = -7.4$ mm, en intervalos de 1 segundo para 5 pasos, mostrado en la Figura 24.

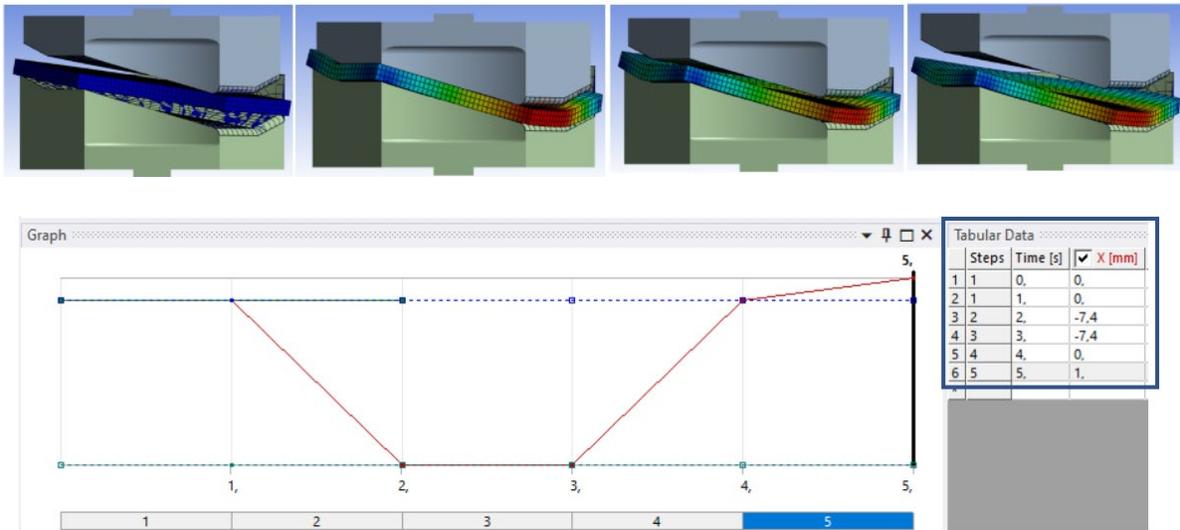


Figura 24. Desplazamientos del dado superior primer simulación.
Elaboración propia

Desplazamientos segunda simulación (2 ciclos).

Posteriormente como se observa en la Figura 25, es propuesto un segundo ciclo consecutivo de desplazamientos del dado superior.

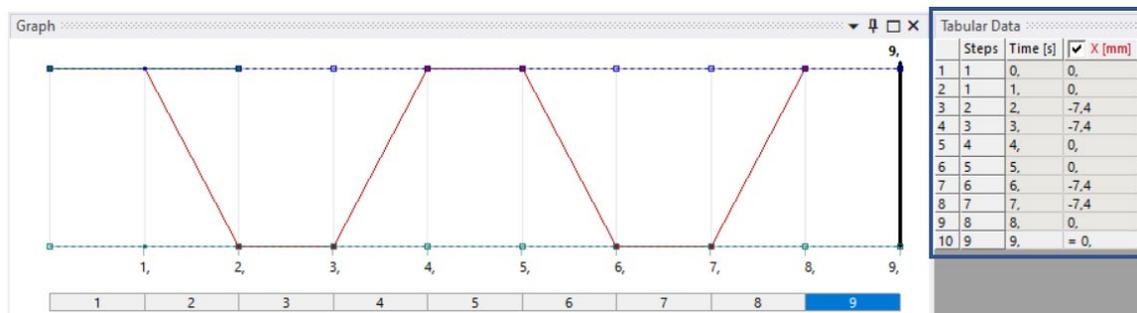


Figura 25. Desplazamientos del dado superior segunda simulación.
Elaboración propia

3.9. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con base en los resultados obtenidos de la simulación (que son presentados en la sección correspondiente), fueron manufacturados los herramientas prototipo en acero 4140 con tratamiento para elevar su dureza superficial. Para la experimentación, se usó un perfil cortado de una placa de acero inoxidable 304,

adicionalmente fueron utilizados 2 perfiles de acero al carbón A36, todos los perfiles de ¼" (6.35mm) de espesor.

4. RESULTADOS

Las pruebas experimentales fueron de gran utilidad para la demostración de la efectividad del método de conformado propuesto, que consistió en ir deformando por secciones la pieza de chapa metálica hasta obtener el perfil helicoidal cóncavo completo. Se realizaron pruebas físicas experimentales con los herramientas prototipo. Con esta información, es posible discutir la efectividad del herramental para lograr el conformado.

4.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

El método de energía de distorsión desarrollado principalmente por Von Mises en 1913, es comúnmente utilizado hoy en día y aceptado para el estudio de aceros homogéneos e isentrópicos dúctiles según (Norton, 2011).

En situaciones que implican esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortantes, el enfoque de energía de distorsión proporciona un buen medio. El esfuerzo equivalente de Von Mises σ' se define como "el esfuerzo de la tensión uniaxial que generaría la misma energía de distorsión que la combinación de los esfuerzos reales aplicados" (Norton, 2011). De esta teoría se llega a las siguientes ecuaciones importantes:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3}$$

Ecuación 9. Esfuerzo equivalente de Von Mises.

Donde σ_1 , σ_2 , σ_3 , son los esfuerzos principales en los 3 ejes coordenados.

La Ecuación 9 define las condiciones de falla, para efectos de diseño resulta conveniente el factor de seguridad N, el cual se calcula con la Ecuación 10:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'}$$

Ecuación 10. Factor de seguridad.

Donde S_y es el valor de la resistencia a la fluencia del material.

4.1.1. Esfuerzos

Fue posible la obtención del valor y localización del esfuerzo máximo equivalente promedio de Von Mises, cuyo dato es presentado en la Tabla 7, además, el comportamiento de los esfuerzos promedio son presentados en el gráfico de la Figura 28. El esfuerzo máximo equivalente promedio se alcanza en el segundo 2 para el primer ciclo de conformado y en el segundo 6 para el segundo ciclo. Lo cual indica que el esfuerzo a la cedencia del acero ha sido superado produciendo una deformación permanente de la pieza.

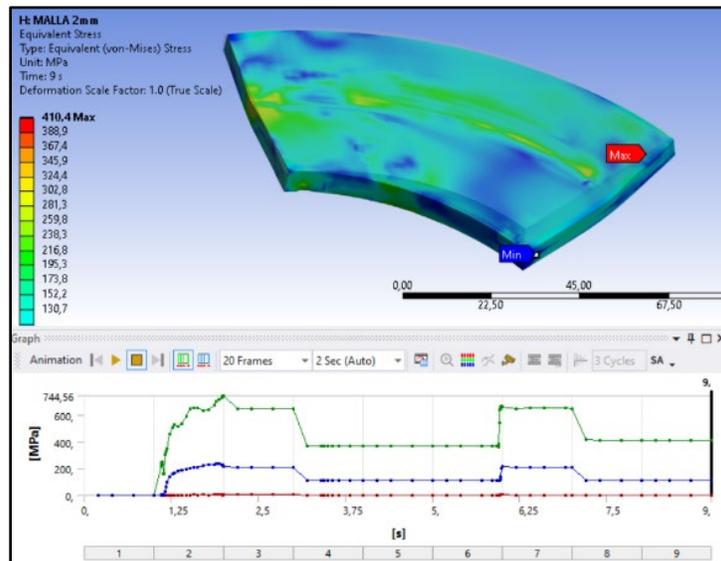


Figura 26. Esfuerzos equivalentes de Von Mises, tercera iteración para dos ciclos de carga.
Elaboración propia

Con la información obtenida es posible conocer el factor de seguridad mínimo y su localización, es decir, la zona de la pieza donde tendería a fallar primero (fracturarse), en el gráfico de tendencia en color azul de la Figura 29.

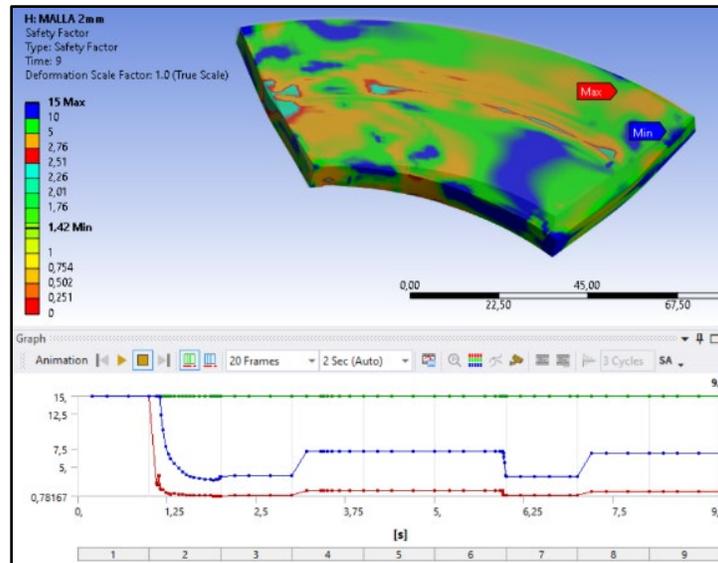


Figura 27. Factores de seguridad, tercera iteración para dos ciclos de carga.
Elaboración propia

4.1.2. Deformaciones

Aunado a lo anterior, fueron obtenidos los valores de desplazamientos en todo el volumen del perfil helicoidal cóncavo, el grafico de la Figura 30 muestra el comportamiento del material en el proceso de conformado respecto al promedio de su deformación. Para el primer ciclo de compresión en el intervalo de tiempo de 0 al 4 segundos, la deformación máxima alcanzada es de 7.95mm, que ocurre en el intervalo de 2 a 3 segundos cuando el herramental superior comprime al material, una vez retirada la carga el material presenta una recuperación elástica en el intervalo de tiempo que va del segundo 4 al 5.7, llegando a un estado de deformación máxima promedio de 7.4mm, con este resultado es posible hacer la estimación teórica de la recuperación que resultaría de la diferencia de deformaciones máximas obtenidas, $SB_1 = 7.95\text{mm} - 7.4\text{mm} = 0.55\text{mm}$.

Para el segundo ciclo de compresión que va del intervalo de tiempo de 5 a 9 segundos, la deformación máxima alcanzada es de 8.1mm que ocurre en el intervalo de 6 a 7 segundos cuando el herramental superior comprime por segunda vez al material, se presenta una recuperación elástica en el intervalo de tiempo que va del segundo 7.2 al 9, el promedio deformación máxima resulta de 7.67mm,

con este resultado es posible hacer la estimación teórica de la recuperación para el segundo ciclo de carga, $SB_2 = 8.1\text{mm} - 7.67\text{mm} = 0.43\text{mm}$.

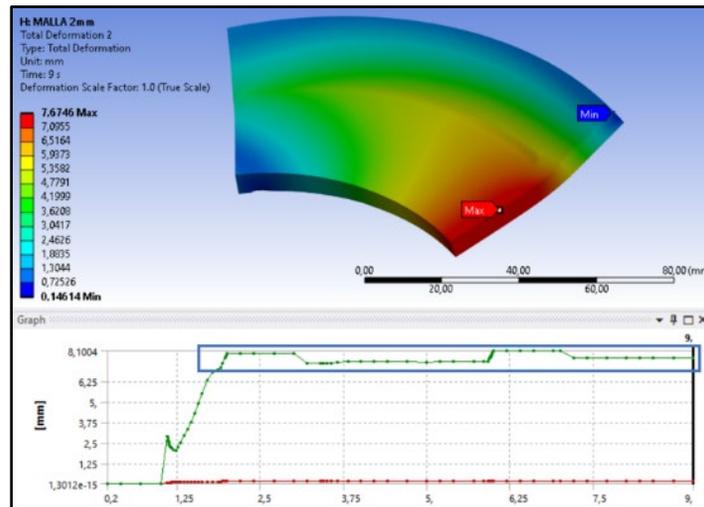


Figura 28. Deformaciones y efecto del springback para dos ciclos de carga.
Elaboración propia

Por tanto, es posible calcular la diferencia de recuperación para el modelo durante el proceso de conformado, $SB_1 - SB_2 = 0.12\text{mm}$.

4.1.3. Comparación del perfil deformado con el software ANSYS

Fue realizada la comparación sobreponiendo el perfil exportado del software ANSYS y el modelado con el software CAD Inventor. En la Figura 31 se muestra la comparación respecto al perfil obtenido para un ciclo de compresión y en la Figura 32 para dos ciclos de compresión respectivamente. Se puede observar que ambos perfiles deformados virtualmente se ajustan a la geometría del ideal.

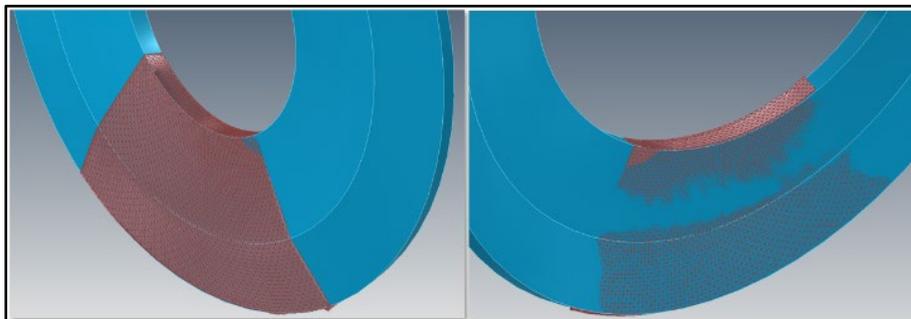


Figura 29. Sección exportada superpuesta sobre modelo CAD. Primera simulación.
Elaboración propia

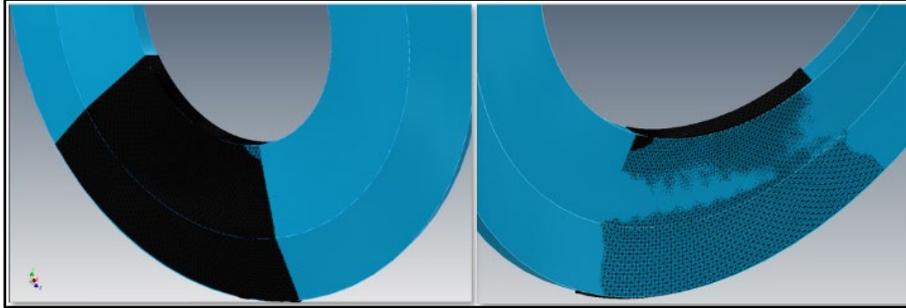


Figura 30. Sección exportada superpuesta sobre modelo CAD. Segunda simulación.
Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 33, mediante el software CAD se realizó la medición del ángulo de doblez transversal del perfil para dos ciclos de carga.

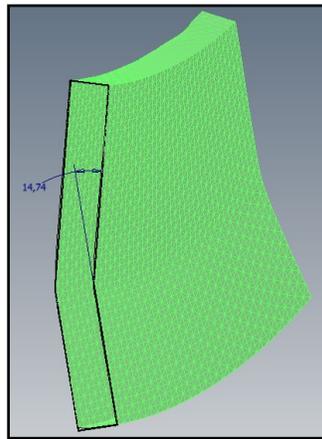


Figura 31. Ángulo de doblez para dos ciclos de carga.
Elaboración propia

4.2. RESULTADOS PRUEBA EXPERIMENTAL

En la Figura 32. Se puede observar los herramientas prototipo macho y hembra manufacturados en la planta de Martin Sprocket & Gear ubicada en Toluca, los cuales fueron utilizados para conformar en frío los perfiles helicoidales de sección transversal curva en aceros A36 y 304. Estos herramientas fueron fabricados en acero 4140 debido a sus buenas propiedades mecánicas y fácil maquinabilidad. Posterior a esto se les aplico un tratamiento térmico superficial de nitrurado gaseoso para elevar su dureza e incrementar su resistencia al desgaste por fricción.



Figura 32. Herramientales prototipos manufacturados en acero 4140 con endurecimiento superficial.
Elaboración propia

Para fines comparativos se muestra en la imagen de la Figura 33 el herramental convencional que actualmente se usa para obtener el perfil helicoidal cóncavo en la Planta ubicada en Burleson, Texas y el recuadro rojo se muestran los herramentales manufacturados. Como se puede observar, hay una diferencia significativa en tamaño, dimensiones y por ende en peso, siendo esto muy relevante para el proceso de conformado.

El contar con herramentales de dimensiones pequeñas y fácil montaje, aporta a la disminución del tiempo de ajuste de la máquina porque son más fácil de manipular, al igual que se reduce el espacio en la planta para su almacenamiento.



Figura 33. Comparación física del herramental prototipo y el utilizado en la planta de Burleson Texas, Estados Unidos.
Elaboración propia

Para propósito de análisis del proceso de conformado de los materiales prueba, se tomaron las siguientes consideraciones:

1. Preformar una de las piezas cortadas en acero A36.
2. Otra igualmente en acero A36, pero sin preformado.
3. La pieza final en acero inoxidable sin preformar

Todas del mismo espesor $\frac{1}{4}$ " (6.35mm).

Lo anterior con el objetivo de saber si la operación de preformado ayudaría a mejorar las características del componente una vez conformado, como se muestra en la Figura 34.



Figura 34. Perfiles cortados en acero A36 para pruebas experimentales (lado izquierdo con la pieza preformada, lado derecho la pieza sin preformar).
Elaboración propia

En la Figura 34 se puede observar el perfil helicoidal cóncavo obtenido después del formado en frío de la placa acero A36. El perfil utilizado fue el que previamente fue placa fue sometida a un proceso de preformado, el cual consistió en hacer una deformado inicial para aproximar la dimensión el paso y posteriormente se realizó el conformado para dar el ángulo de doblez transversal con el cual genera la cavidad cóncava al acoplarlo con un perfil helicoidal de sección transversal recto.

Como se observa en la imagen de la Figura 35, se tiene del lado izquierdo la foto el perfil visto por el lado de la cavidad y del lado derecho esta la fotografía del lado opuesto, cabe resaltar que, para esta prueba con el perfil preformado, el perfil final presenta marcas generadas por la herramienta hebra, es decir el inferior, que es el área opuesta a la cavidad. Estos problemas en la calidad de las piezas no son deseables, por lo que para su corrección sería necesario agregar al proceso de fabricación una operación de desvanecido y detallado de estas marcas, lo que implica mayor tiempo de manufactura y se elevaría el costo por pieza.



Figura 35. Pieza preformada y conformada de placa de acero A36.
Elaboración propia

En la Figura 36 se puede observar para la pieza sin preformado, no presenta marcas por ninguna de las caras con las que se tuvo contacto con los herramientas.



Figura 36. Prueba experimental para la pieza sin preformar del perfil cortado en placa de acero A36.
Elaboración propia

Dado los resultados anteriores en los perfiles conformado en acero A36, para el conformado del perfil de acero inoxidable 304 no se realizó el paso de preformado como se muestra en la imagen del lado derecho en la Figura 37. Se puede observar en las imágenes central e izquierda que la pieza conformada no presento defectos producidos por marcas de los herramientas, confirmando que éstas aparecen cuando se hace la preforma independientemente del material de fabricación.



Figura 37. Prueba experimental para la pieza sin preformar del perfil cortado en placa de acero A36.
Elaboración propia

4.2.1. Medición de pruebas experimentales

Con la finalidad de facilitar la obtención de las dimensiones del paso y ángulo de doblez transversal una vez obtenido el perfil conformado de acero 304, se realizó el acople con el tubo estructural y el seccional de perfil transversal recto, como se muestra en las Figura 38 y Figura 39. Estos elementos conforman una sección del alabe helicoidal con cavidad.

En la Figura 38 se presenta la medición del ángulo de doblez transversal, el valor obtenido fue de 14.5° , el cual no está muy desviado de los 15° esperados, está dentro de la tolerancia de $\pm 1^\circ$ (EL GRAN CATALOGO 4000, Martin Sprocket & Gear).



Figura 38. Medición del ángulo una vez hecho el ensamble, de doblez en la parte posterior del alabe.
Elaboración propia

Como se muestra en la Figura 39, fue realizada la medición del paso cuyo valor obtenido fue de 4.185" (106.3mm), cuya dimensión se encuentra dentro del intervalo con las tolerancias presentadas en la Tabla 4 (EL GRAN CATALOGO 4000, Martin Sprocket & Gear).

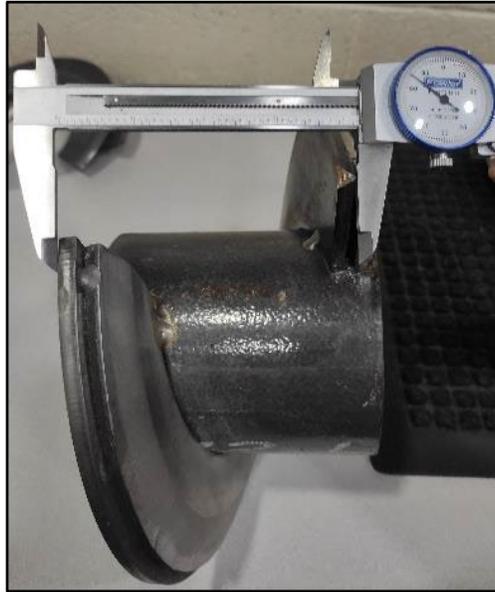


Figura 39. Medición del paso en el ensamble de los perfiles para alabe.
Elaboración propia

CONCLUSIONES

En este documento se ha presentado una alternativa para la realización del análisis y obtención del SB para el conformado de una geometría compleja. De lo cual se concluye lo siguiente:

- Es posible realizar el conformado de la pieza por secciones para llegar a la geometría deseada, por el método de conformado por secciones propuesto. Se elimina el proceso de preformado el cual es empleado en las plantas de Burleson y Arlington de Estado Unidos para la fabricación de este tipo de seccionales. La eliminación de operaciones y procesos de manufactura genera la reducción en los tiempos de fabricación de los componentes y, por ende, costos de manufactura menores y mayores márgenes de ganancia.
- La operación de preformado es factor para que en la pieza final se generen marcas, esto debe ser considerado en producciones de alto volumen porque implicaría un proceso adicional para eliminarlas.
- Se presenta una alternativa para la realización del análisis y obtención del springback para el conformado de una geometría compleja. Los resultados de la simulación y análisis por el método de elemento finito son de gran utilidad cuando se requiere validar la fabricación de herramientas prototipo. La diferencia en el ángulo de doblez transversal respecto al perfil ideal del componente deformado virtualmente es de 0.26° .
- El seccional con perfil transversal cóncavo conformado en un solo ciclo de carga cumple con los estándares CEMA, mostrados en la Tabla I. La diferencia en el ángulo de doblez transversal del seccional en acero inoxidable 304 conformado en la prueba experimental respecto al perfil ideal es de 0.5° . Esta desviación angular está dentro de las tolerancias, por tanto, cumple con el estándar de calidad.

RECOMENDACIONES

Los resultados del análisis desarrollado en este documento son para el conformado de seccional helicoidal con perfil cóncavo fabricado de placa de acero inoxidable 304 con las características específicas planteadas en la fase del desarrollo del concepto. Para cualquier cambio en el material, sus propiedades mecánicas o geometría del perfil, se sugiere generar nuevamente la simulación con el número de iteraciones y análisis de convergencia correspondiente.

Para la obtención de mejores resultados para el conformado de componentes físicos, es ampliamente recomendado realizar el diseño y análisis virtual considerando un sobre doblado en el perfil con base en los primeros resultados análisis y repetir el análisis hasta obtener la reducción en desviación geométrica deseada esto con el objetivo de realizar la compensación de la recuperación elástica de la pieza. Es decir, se recomienda optar por un proceso iterativo para la optimización del proceso de conformado.

El análisis del modelo está dirigido específicamente al comportamiento del material al ser deformado. Para la realización de pruebas experimentales se manufacturaron los herramentales considerándolos como cuerpos rígidos no deformables y sin desgaste, si se busca fabricar herramentales para ser utilizados en producción de alto volumen se recomienda realizar un análisis independiente que ayude a establecer las consideraciones adecuadas ante condiciones de fatiga y desgaste, para asegurar su óptimo funcionamiento.

APORTACIÓN DE LA TESIS

Este trabajo de tesis contribuye en el desarrollo de conocimiento técnico para el proceso de conformado de chapa metálica en general y específicamente de perfiles seccionales con sección transversal cóncava, de la siguiente manera: 1. Un modelo virtual en el software ANSYS que caracteriza el material y los herramientas para la realización del conformado. 2. El modelo presentado puede ser replicado para el análisis para el conformado de cualquier seccional helicoidal de sección transversal cóncava. 3. Se presenta una alternativa para la manufactura de este tipo de componentes en la planta de Toluca, Estado de México, contribuyendo con el crecimiento tecnológico y de investigación en el área de conformado de chapa metálica.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

En términos económicos, el negocio de herramientas es una oportunidad para que México sea más independiente, ya que la mayor parte de la maquinaria es importada. El planteamiento para poder contrarrestar esto, es ir bajo la tendencia de generar manufactura de valor agregado, partiendo de un buen diseño para la transformación posterior de los materiales en herramientas, que a su vez serán usados para crear miles de componentes más, en ese momento dejamos de ser solo proveedores de mano de obra y generamos un valor real agregado. Se genera un documento de consulta de carácter público, que aporta a la capacitación técnica de ingenieros desarrolladores de herramientas para conformado de chapa metálica, con base en conceptos de ingeniería de diseño, usando software de modelado CAD, prototipado mediante métodos de manufactura aditiva, simulación, análisis de elementos finitos CAE y la experiencia adquirida en la aplicación. La reducción del tamaño y peso en los herramientas ayuda a que el operador de la maquina pueda manipular estos componentes con mayor facilidad, se eliminó la necesidad de manipular algún equipo auxiliar de carga y se redujo el riesgo a accidentes ocasionados por la manipulación de objetos pesados en la fase de montaje de los herramientas.

REFERENCIAS

- Allwood, J. M., Duncan, S. R., Cao, J., Groche, P., Hirt, G., Kinsey, B., Kuboki, T., Liewald, M., Sterzing, A., & Tekkaya, A. E. (2016). Closed-loop control of product properties in metal forming. *CIRP Annals*, 65(2), 573–596. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.002>
- ANSYS (2022 R2). (s/f). [Software]. <https://www.ansys.com/>
- Autodesk. Inventor (Versión 2022) [Software]. Autodesk. <https://manage.autodesk.com/products>
- Avemann, J., Calmano, S., Schmitt, S., & Groche, P. (2014). Total Flexibility in Forming Technology by Servo Presses. *Advanced Materials Research*, 907, 99–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.907.99>
- Badr, O. M., Rolfe, B., & Weiss, M. (2018). Effect of the forming method on part shape quality in cold roll forming high strength Ti-6Al-4V sheet. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.022>
- Beddoes, J., & Bibby, M. J. (1999). *Principles of metal manufacturing processes*. Arnold.
- Boljanovic, V. (2004). *Sheet metal forming processes and die design*. Industrial Press.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (Novena)*. McGraw-Hill.
- Cengel, U. A. (2007). *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico (Tercera)*. McGraw-Hill.
- Cybulski, R., Walentyński, R., & Cybulska, M. (2014). Local buckling of cold-formed elements used in arched building with geometrical imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*, 96, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.01.004>
- García-Romeu, M. L., & Ciurana, Q. de. (2005). Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final. *Universitat de Girona*.
- Gardner, L., & Yun, X. (2018). Description of stress-strain curves for cold-formed steels. *Construction and Building Materials*, 189, 527–538. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.195>
- Gröbel, D., Koch, J., Vierzigmann, H. U., Engel, U., & Merklein, M. (2014). Investigations and Approaches on Material Flow of Non-uniform Arranged Cavities in Sheet Bulk Metal Forming Processes. *Procedia Engineering*, 81, 401–406. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.013>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna (Tercera)*. McGraw-Hill.

- INEGI. Economía y sectores productivos. Industria Manufacturera. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/manufacturas/>
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta). PEARSON.
- Li, Q.-M., Yi, Z.-W., Liu, Y.-Q., Tang, X.-F., Jiang, W., & Li, H.-J. (2021). Explicit Analysis of Sheet Metal Forming Processes Using Solid-Shell Elements. *Metals*, 12(1), 52. <https://doi.org/10.3390/met12010052>
- Lu, B., Fang, Y., Xu, D. K., Chen, J., Ou, H., Moser, N. H., & Cao, J. (2014). Mechanism investigation of friction-related effects in single point incremental forming using a developed oblique roller-ball tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.04.007>
- Ma, J., & Welo, T. (2021). Analytical springback assessment in flexible stretch bending of complex shapes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103653. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103653>
- Merklein, M., Allwood, J. M., Behrens, B.-A., Brosius, A., Hagenah, H., Kuzman, K., Mori, K., Tekkaya, A. E., & Weckenmann, A. (2012). Bulk forming of sheet metal. *CIRP Annals*, 61(2), 725–745. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.007>
- Miguel, V., Coello, J., Martínez, A., & Calatayud, A. (2013). Evaluación del springback mediante ensayos de doblado bajo tensión en condiciones de multiaxialidad típicas de los procesos de embutición profunda. Aplicación a chapa de acero inoxidable AISI 304 DDQ. *Revista de Metalurgia*, 49(3), 165–177. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1248>
- Mori, K., Akita, K., & Abe, Y. (2007). Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2), 321–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.013>
- Mott, R. L., & Navarro Salas, R. (2009). *Resistencia de Materiales* (5a ed). Pearson.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas un enfoque integrado* (Cuarta). PEARSON.
- Pérez Martínez, O., & Medellín-Castillo, H. I. (2019, septiembre 18). Análisis y evaluación del efecto de springback en procesos de doblado de lámina de acero. *MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, 9.
- Pimentel, H. E., Gutiérrez, H. A., Cantera, J. A. B., & Herrera, J. E. G. (2023). Adjust operating conditions of an in-made house horizontal hydraulic press for a 90° cold bending process. *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*, 12. <https://doi.org/10.37636/recit.v6n4e326>
- Power Transmission, Material Handling & Hand Tool Manufacturer. Recuperado el 26 de julio de 2022, <https://www.martinsprocket.com/>

- Praveen, K., Lingam, R., & Venkata Reddy, N. (2020). Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 510–523. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.014>
- Ren, H., Li, F., Moser, N., Leem, D., Li, T., Ehmann, K., & Cao, J. (2018). General contact force control algorithm in double-sided incremental forming. *CIRP Annals*, 67(1), 381–384. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.057>
- Russell C. Hibbeler. (2011). *Mecánica de Materiales (Octava)*. PEARSON.
- Screw conveyors for bulk materials (Fifth edition). (2015). Conveyor Equipment Manufacturers Association.
- Smith, D. A. (1990). *Die Design Handbook, Third Edition (Third)*. Society of Manufacturing Engineers SME.
- Suchy, I. (2006). *Handbook of die design (2nd ed)*. McGraw-Hill.
- Tekner, Z. (2004). An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.07.005>
- Tekkaya, A. E. (2000). State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(1), 14–22. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00413-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00413-1)
- Transportadores de Tornillo, Bega, Mexico. (s/f). Bega Helicoidales. Recuperado el 17 de septiembre de 2023, de <https://www.begahelicoidales.com/industrias-transportador-de-tornill>
- Transportadores Helicoidales. (2023). Martin Sprocket & Gear. <https://www.martinsprocket.com/view/material-handling-products/material-handling>
- Vargas, S. B. (2017). Desarrollo de un Modelo Virtual para el Conformado de Aceros Inoxidables. *Revista Ingeniería*, 28(1), 1. <https://doi.org/10.15517/ri.v28i1.29257>
- Wu, F., Hong, Y., Zhang, Z., Huang, C., & Huang, Z. (2023). Effect of Lankford Coefficients on Springback Behavior during Deep Drawing of Stainless Steel Cylinders. *Materials*, 16(12), 4321. <https://doi.org/10.3390/ma16124321>
- Yang, D. Y., Bambach, M., Cao, J., Duflou, J. R., Groche, P., Kuboki, T., Sterzing, A., Tekkaya, A. E., & Lee, C. W. (2018). Flexibility in metal forming. *CIRP Annals*, 67(2), 743–765. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.05.004>
- Yu, Y., Lan, L., Ding, F., & Wang, L. (2019). Mechanical properties of hot-rolled and cold-formed steels after exposure to elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials*, 213, 360–376. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.062>