



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

COMPARACIÓN CUANTITATIVA ENTRE MODELO Y EXPERIMENTO EN EL
EMBUTIDO DE LÁMINA DE ALUMINIO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
DIEGO RICARDO PICHARDO ARAGÓN

TUTOR PRINCIPAL
RAFAEL SCHOUWENAARS
FACULTAD DE
INGENIERÍA

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Cuida tus pensamientos, porque se convertirán en tus palabras.

Cuida tus palabras, porque se convertirán en tus actos.

Cuida tus actos, porque se convertirán en tus hábitos.

Cuida tus hábitos porque se convertirán en tu destino.

(Mahatma Gandhi)

Agradecimientos

Esta tesis no podría ser realizada sin el apoyo de las personas más importantes en mi vida, a quienes tengo que agradecer con todo mi corazón ya que a pesar de todo este tiempo nunca dejaron de creer en mí:

A mis padres, Elvira Enriqueta Aragón Calvo y David Román Pichardo Sánchez, no sería quien soy sin sus enseñanzas y sacrificios para que yo tuviera las herramientas necesarias para poder enfrentar la vida solo y salir siempre adelante.

A mis hermanos David Rogelio Pichardo Aragón y Daniel Román Pichardo Aragón. Quienes a pesar de nuestras diferencias siempre hemos estado para apoyarnos los unos a los otros.

A mis tías María Teresa Pichardo y Sánchez y Siria Lidia Pichardo y Sánchez, que al igual que mi familia, siempre me han brindado su apoyo incondicional.

También tengo que agradecer a mis compañeros y profesores de la facultad, por su amistad, colaboración profesional y formación como ingeniero:

A mis compañeros Juan Javier Martínez, Erick Francisco Luz López, Eduardo Cuevas, Pablito Loquillo CNC, Pablo Eduardo Lira y Juan Carlos Bodoque con quienes compartí horas en los talleres de Ingeniería Mecánica.

Al Maestro Ignacio Cueva, por su enseñanza y su paciencia en la elaboración de todos los diseños, elaboración y puesta en marcha de los troqueles.

Al Doctor Miguel Ángel Ramírez, por su apoyo en el modelado y el uso de la paquetería especializada.

Al Doctor Rafael Schouwenaars, por su tutoría y paciencia. De igual forma a mi comité de sinodales; Dr. Arturo Barba Pingarron, Dr. Victor Hugo Jacobo, Dr. Adrián Espinoza y Dr. Carlos Figueroa.

A los Profesores Leo Kestens (UGent) y Albert Van Bael, por apoyarnos con los materiales y la paquetería utilizada en este trabajo.

Al Maestro Efraín Ramos para el uso y capacitación del escáner de coordenadas 3D de la marca FARO, ubicado en los laboratorios de Mediciones Mecánicas de la Facultad de ingeniería.

Se agradece el apoyo financiero del proyecto PAPIME PE111620 ("desarrollo de material didáctico para la manufactura de herramientas") durante el inicio del trabajo de tesis y el proyecto PAPIIT IN IN113123 (Estudio fundamental de la interacción entre mecanismos de endurecimiento durante la deformación plástica en aleaciones policristalinas) durante su finalización.

Introducción

Motivación del trabajo

Importancia tecnológica

Por definición, la industria metalmecánica se dedica al aprovechamiento de los productos obtenidos en los procesos de manufactura para fabricar partes, piezas o productos terminados, como maquinarias, equipos o herramientas. La industria metalmecánica es una de las más relevantes de los sistemas productivos a nivel mundial, pues va ligado con su capacidad para la fabricación de productos con altos niveles de sofisticación, que incrementan la capacidad tecnológica, económica y de innovación del país.

Entre la multitud de operaciones de conformado que existen, esta tesis estudia el proceso de troquelado, específicamente el proceso de embutido que consta de una herramienta que obliga a la lámina a deformarse permanentemente en dirección radial. Las operaciones de troquelado se usan para la producción en serie de varias piezas en sectores como: electrodomésticos, aeronáutico, automotriz, alimenticio, naval e informática, entre otros. A pesar de que México ocupa una posición importante en la producción de los herramientas, ésta aún no cubre las necesidades requeridas por la industria, por lo que el desarrollo de este proceso se ha convertido en un área de estudio importante.

En el diseño de las herramientas, es siempre más común el uso de herramientas computacionales como el método de elemento finito. Desde hace varias décadas, se ha reconocido la importancia de la anisotropía de la lámina metálica en el conformado. Esta tesis utilizará una paquetería desarrollada en la Universidad de Lovaina (Bélgica) que permite incorporar este fenómeno en los modelos. El método jerárquico multiescala (HMS) forma el núcleo de esta paquetería y se encuentra en un desarrollo constante. Por lo anterior, este trabajo permitirá la mejora continua de la herramienta HMS para obtener resultados más satisfactorios con mejores predicciones en la simulación de los procesos de conformado de lámina de aluminio.

Importancia Didáctica

Actualmente en los laboratorios de ingeniería mecánica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, la práctica de troquelado es puramente demostrativa y se pueden observar aspectos cualitativos de los productos troquelados. Sin embargo, aunque en las clases se mencionan algunos de los aspectos importantes relacionados con el troquelado, debido al tiempo limitado para la demostración, el alumno no da la debida importancia al troquel, propiedades de la lámina, geometría a troquelar,

fuerzas del proceso de troquelado y lubricantes, ya que su atención solo está enfocada en la parte operativa de la máquina troqueladora.

Con los troqueles que se desarrollaron en proyectos anteriores, [1], [2], los alumnos y profesores podrán realizar ejercicios de ensamble, preparación para la puesta en marcha de los experimentos para la medición de las fuerzas de troquelado en tiempo real y la verificación de dimensiones (con la ayuda del escáner de coordenadas) del producto resultante de la operación de troquelado para la comparación con los resultados de modelos de elemento finito como son HMS.

Cabe resaltar la importancia que tiene el presente trabajo al desarrollar material para poner en práctica las habilidades de los estudiantes para el diseño y la manufactura de herramientas con los conocimientos que adquieren durante la vida como estudiante en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería, y así, poder concluir de manera satisfactoria elementos de calidad y además funcionales, permitiendo al egresado un grado de especialización importante para poder resolver problemas en el ámbito profesional.

Organización del trabajo

El contenido de este trabajo se divide en cinco capítulos los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1 se discutirán los antecedentes necesarios que relacionan el proceso de embutido como son conceptos fundamentales hasta modelos y diseños que se realizan en dicho proceso.

Dichos antecedentes se utilizaron para desarrollar el diseño de dos troqueles para realizar el ensayo de Fukui de forma experimental. Este ensayo fue analizado de forma teórica anteriormente en el trabajo de Tesis del Dr. Miguel Ángel Ramírez Toledo, el cual lleva por nombre *“Modelado de proceso de estampado profundo mediante un código de elemento finito para deformación plástica anisotrópica”*. [3]

En el capítulo 2 se describen los troqueles que se utilizaron a lo largo de este proyecto de tesis. Se menciona desde su diseño, ensamble, instrumentación e instalación para la puesta en marcha de los ensayos de embutido en lámina de aluminio.

Los troqueles fueron instrumentados para realizar mediciones en tiempo real de los ensayos realizados durante este proyecto de tesis. Dicha instrumentación se logró gracias al apoyo por parte de los proyectos PAPIME para la adquisición de equipo de mediciones de la marca *“Kistler”*, el cual se encuentra en el laboratorio de mediciones mecánicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

El capítulo 3 cubre todo el proceso que se siguió para realizar los experimentos de los ensayos de embutido para las aleaciones de lámina de aluminio Al 1100, Al 3103 y Al 5005, obteniendo como resultado una geometría hueca sencilla en forma de copa para que posteriormente estos productos puedan ser digitalizados a través de un escáner de coordenadas 3D y poder realizar la comparación de los resultados obtenidos de la simulación del ensayo de embutido contra los resultados experimentales que se obtienen a lo largo de este proyecto de tesis.

Continuando con el Capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de embutido y el análisis de estos al ser comparados registrando todos los datos que se obtuvieron para presentar una discusión crítica de estos resultados generaron.

Finalmente, en el Capítulo 5, se mencionan las conclusiones a la que se llegaron al final del desarrollo de este trabajo de tesis para conocer si los objetivos se cumplieron y en caso contrario, indicar cuales fueron las posibles causas.

Objetivos

Instrumentación y puesta en marcha de los troqueles para el ensayo de embutido.

Realizar la comparación entre modelo y experimento en el ensayo de embutido de lámina de aluminio a través del ensamble y la instrumentación de los troqueles para realizar el ensayo de embutido de piezas en forma de copa.

Modelado

Validar el modelo de elemento finito para el proceso de embutido en geometría sencilla para lámina de aluminio de un espesor (t) de 0.85mm. Para este fin, se utiliza la paquetería HMS desarrollada en la Universidad de Lovaina, Bélgica. No es un objetivo de esta tesis profundizar en la teoría detrás de este método.

Mediciones

- Calibrar el troquel instrumentado para la medición de fuerzas del proceso de embutido.
- Determinar la geometría del producto obtenido mediante máquina de coordenadas digital para comparar los resultados experimentales con los modelos de elemento finito.
- Implementar un protocolo para futuros proyectos para el embutido en geometría sencilla y/o compleja.

Índice Temático

Agradecimientos.....	II
Introducción.....	III
Motivación del trabajo	III
Importancia tecnológica	III
Importancia Didáctica	III
Organización del trabajo	IV
Objetivos	VI
Índice de Tablas.....	X
Índice de Figuras.....	XI
Capítulo 1. Antecedentes	1
1.1 El sector metalmecánico en México.....	1
1.1.1 Panorama	1
1.1.2 Importancia económica.....	1
1.1.3. Sectores.....	2
1.1.4. Nuevas tecnologías y tendencias en la industria	3
1.2 Conceptos fundamentales	3
1.2.1 Comportamiento elástico y plástico	3
1.2.2 Origen cristalino de la deformación plástica	4
1.2.3 Textura y anisotropía	5
1.2.4 Homogenización	7
1.2.5 Criterios de cedencia	9
1.2.6. Los ensayos virtuales.	11
1.2.7. Subrutina de usuario.....	11
1.3 Modelado	12
1.3.1 Función del modelado.....	12
1.3.2 Método de elemento finito.....	12
1.3.3 Modelado multi-escala.....	13
1.4 Proceso de troquelado	14
1.4.1 Proceso de corte.....	15
1.4.2 Proceso de embutido	17
1.5 Mediciones.....	21

1.5.1 Celda de carga y sistemas de adquisición	21
1.5.2 Máquinas de coordenadas.....	22
Capítulo 2. Descripción e instrumentación de los troqueles para el ensayo de embutido.....	25
2.1 Diseño de troqueles para el embutido de lámina de aluminio.	25
2.1.1 Diseño del troquel de corte	25
2.1.2 Diseño del troquel de embutido	27
2.2 Ensamble de los troqueles.....	29
2.2.1 Ensamble del troquel de corte	29
2.2.2 Ensamble troquel de embutido	30
2.2.3 Instalación de troqueles en la prensa mecánica.	30
2.3 Equipo de medición de fuerzas.....	33
2.3.1 Configuración.....	33
2.3.2 Modo de conexión del equipo	34
2.3.3 Calibración de la celda de carga.....	34
2.3.4 Configuración de la paquetería por primera vez	35
2.3.5 Adquisición de datos con la prensa mecánica:	36
2.4 Materiales	37
2.4.1 Aluminio Al 1100.....	37
2.4.2 Aluminio Al 3103.....	37
2.4.2 Propiedades.....	38
Capítulo 3. Experimentación, escaneo y simulación	39
3.1 Simulación del Ensayo de Embutido.....	39
3.1.1 Ensayo de Swift	39
3.1.2 Validación de la simulación.....	39
3.2 Experimentación Ensayo de Embutido	40
3.2.1 Proceso de corte.....	40
3.2.2 Proceso de embutido	41
3.3 Procedimiento de digitalización de las copas.....	43
3.3.2 Obtención de la geometría de las piezas embutidas	44
Capítulo 4. Resultados y discusiones.....	52
4.1 Aluminio 1100	52
4.2 Aluminio 3103	55

4.3 Aluminio 5005	59
4.4 Discusión	62
4.4.1 Ensayo de Embutido	62
4.4.2 Digitalización de las piezas	63
4.4.3 Comparación entre modelo y simulación	64
Capítulo 5. Conclusiones	66
Bibliografía	67

Índice de Tablas

Tabla 2.1.- Tolerancia para el cálculo de claro, en función del material a trabajar. [19]	25
Tabla 2.2 - Características principales de la troqueladora MEISTER.....	31
Tabla 3.1 - Indicadores del palpador láser.	45
Tabla 3.2 - Incompatibilidad entre las gráficas de ABAQUS y medición de coordenadas.....	50

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Geometría que describe la ley de Schmid. [11].....	5
Figura 1.2 - Sistemas de referencia para plasticidad policristalina.....	6
Figura 1.3 - Definición de los ángulos de Euler mediante tres rotaciones consecutivas.....	7
Figura 1.4 - Nodos y elementos de una malla.....	13
Figura 1.5 - (a) porta punzón, (b) postes guía, (c) punzón, (d) pisador, (e) matriz, (f) tornillos guía con resortes (g) porta matriz.....	15
Figura 1.6 – Fases del proceso de corte por cizalla. [1]	16
Figura 1.7 – Zonas en los bordes, 1) redondeado, 2) bruñido, 3) fractura, 4) rebaba. [1]	16
Figura 1.8 – Operaciones de corte. [1].....	17
Figura 1.9 - Embutido de una pieza acopada. [19].....	18
Figura 1.10 - Proceso de embutido; 1) Forma inicial, D_b =Diametro inicial; 2) Pieza cóncava después de la operación, D_p =diámetro del punzón. [19].....	18
Figura 1.11 - Embutido en frio.....	19
Figura 1.12 - Embutido en caliente. [21].....	20
Figura 1.13 - Monocasco de un automóvil.[20].....	20
Figura 2.1 – Piezas principales del troquel de corte, a) Punzón de corte, b) Pisador, c) Matriz de corte.....	26
Figura 2.2 – Dibujo del troquel de corte ensamblado. [1]	26
Figura 2.3 – Piezas principales del troquel de embutido, a) Punzón embutido, b) Pisador con guía, c) Matriz de embutido.....	28
Figura 2.4 – Dibujo del troquel de embutido ensamblado.....	28
Figura 2.5 - Troquel de corte para discos de 85mm.....	29
Figura 2.6 - Troquel de corte para discos de 85mm.....	29
Figura 2.7 - Troquel de embutido.....	30
Figura 2.8 - Troqueladora MEISTER.....	31
Figura 2.9 - Alineación del troquel de embutido.....	32
Figura 2.10 - Equipo de medición de fuerzas para troqueles.....	33
Figura 2.11 - Herramientas para la calibración de la celda de carga.....	34
Figura 2.12 - Ensamble de la espiga con la placa para calibración.....	35
Figura 2.13 – Ventana de configuración inicial.....	36
Figura 2.14 - Leyes de endurecimiento de Voce. [27].....	38

Figura 3.1 – Modelo para copa Al5005.	39
Figura 3.2.- Modelo final para copa Al5005.....	40
Figura 3.3 - Lámina de aluminio troquelada.	41
Figura 3.4 – Disco de AA5005 listo para embutir.	42
Figura 3.5 – Accionamiento de la máquina troqueladora.	42
Figura 3.6 – Copa embutida y fuerza de embutido para Al5005.	43
Figura 3.7 – Base con tornillo.....	44
Figura 3.8 – Copas de Al 3103 con fondo pintado, negro mate.	44
Figura 3.9 – Led indicador del palpador láser.	45
Figura 3.10 - Copa de Al5005 completamente cerrada con paquetería Meshmixer.	46
Figura 3.11 - Ejemplo de la nube de puntos graficada por Mathematica.	47
Figura 3.12 - Ejemplo de los nodos en la copa AA5005, graficada por Mathematica.	49
Figura 3.13 - AA 5005. Perfiles de oreja sin corrección, simetrizadas (Fórmula 28) y obtenida en el modelo.	51
Figura 3.14 - AA5005 Perfiles de oreja para los valores de $\delta\theta$ y δh óptimas.....	51
Figura 4.1 – Grafica de fuerzas para Al 1100.....	52
Figura 4.2 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 1100..	53
Figura 4.3 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al 1100.	53
Figura 4.4 – Grafica de Altura de la copa para Al 1100.....	54
Figura 4.5 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 1100.	55
Figura 4.6 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 1100. Rojo simulación, negro experimento.....	55
Figura 4.7 – Grafica de fuerzas para Al 3103.....	56
Figura 4.8 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 3103..	56
Figura 4.9 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al3103.	57
Figura 4.10 – Grafica de Altura de la copa para Al 3103.....	57
Figura 4.11 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 3103.	58
Figura 4.12 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 3103. Rojo simulación, negro experimento.....	59
Figura 4.13 – Grafica de fuerzas para Al 5005.....	59

Figura 4.14 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 5005.	60
Figura 4.15 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al5005.	60
Figura 4.16 – Grafica de Altura de la copa para Al 5005.....	61
Figura 4.17 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 5005.	61
Figura 4.18 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 5005. Rojo simulación, negro experimento.....	62

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 El sector metalmeccánico en México

1.1.1 Panorama

Hoy México representa una capacidad productiva esencial para la economía mundial, por ser un país que, gracias a su modelo de operación, locación geográfica y vocación, surte a Norteamérica y el resto del mundo un número considerable de operaciones y productos en el área metalmeccánica como el troquelado.

En una columna en línea, Eduardo Medrano, presidente de la Asociación Mexicana de Manufactura de Moldes y troqueles (AMMMT), menciona que la diversidad en las actividades económicas de cada país es notable. En el caso de México, la evolución de su sector productivo ha destacado a nivel internacional, principalmente debido a su constante expansión mediante la inversión en industrias como la automotriz, aeroespacial, de implementos médicos, electrónicos, electrodomésticos y, más recientemente, en la manufactura de moldes, troqueles y herramientas. [4]

El sector metalmeccánico comprende maquinarias industriales y herramientas indispensables en la línea de producción de las industrias de manufactura. Su objetivo es transformar la materia prima que proviene de los metales para así obtener láminas, alambres, placas, entre otros materiales que se utilizan en diversos sectores.

A su vez, Yosselin Teyssier, realiza una publicación en línea donde resalta que esta área de actividad se caracteriza por la sofisticación de sus procedimientos, demandando una precisión notable por parte de los trabajadores. Estos deben poseer habilidades especializadas, como torneros, matriceros, fundidores, fregadores, rectificadores y soldadores. [5]

1.1.2 Importancia económica

En un blog realizado por Bardahl industria, destaca que la industria metalmeccánica aporta anualmente el 2.3% del PIB manufacturero en México. La industria metalmeccánica nacional está integrada por 23,120 empresas de las cuales 20,100 son pymes. El área de la metalmeccánica está conformada por fabricantes de alambre, tornillos, tuercas, roldanas, forjas, alimentadores de prensas para troquelado, de fundición, de maquinados, galvanizado, de soldadoras y herramientas para roscar. [6]

También participan compañías que incorporan en sus operaciones servicios de calderería, afilado, cizallado, cepillado, conformado de láminas, torneado,

punzonado, taladrado, pintura de componentes metálicos, galvanizado, cromado de piezas, fabricación de cerraduras, llaves manuales, corte y plegado de piezas metálicas, así como procesos de inyección de componentes plásticos, estampado y troquelado. [6]

En 2019, la firma consultora PwC (PricewaterhouseCoopers) incluyó a México entre los 10 países más atractivos para la inversión, superando a naciones como Japón, Rusia y Hong Kong, principalmente debido al renovado Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). Además, se ha observado un crecimiento significativo en la industria metalmecánica, impulsada por el sector automotriz en México. Según datos de la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA), la producción nacional de vehículos ligeros en marzo de 2020 registró un aumento del 4.8%, alcanzando las 346,876 unidades en comparación con el mismo mes de 2019. Asimismo, las exportaciones continúan en aumento, con un incremento del 2.1% en el primer trimestre de 2020 en comparación con las 819,714 unidades exportadas en el mismo período de 2019. [6]

Según la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en junio de 2021, las exportaciones de productos manufacturados desde México ascendieron a 37,366 millones de dólares, reflejando un aumento del 26.7% en comparación con el año 2020, que experimentó una significativa desaceleración debido a la pandemia. Los sectores que experimentaron los mayores crecimientos estuvieron vinculados a la industria metalmecánica, como la siderurgia con un incremento del 65.7%, los productos automotrices con un 37.9%, los equipos y aparatos eléctricos y electrónicos con un 16.5%, y la maquinaria y equipo para diversas industrias con un 8.6%. [7]

1.1.3. Sectores

Las piezas más comunes que se hacen por embutido son latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y partes de carrocería automotriz. En adición a estas aplicaciones tradicionales, hoy en día es posible adquirir miles de productos con tendencia a reducir su tamaño, en lo particular, productos electrónicos como celulares, computadoras y reproductores de música y video.

Regresando con lo mencionado por Eduardo Medrano, él resalta que la gama de aplicaciones de la industria metalmecánica es tan extensa como las oportunidades que actualmente ofrece el mercado global, especialmente en el de Norteamérica. Esto abarca desde procesos de laminado y conformado de metales para la producción de racks de almacenamiento, hasta la manufactura de las piezas más sofisticadas utilizadas en la industria aeroespacial o médica. [4]

1.1.4. Nuevas tecnologías y tendencias en la industria

En un artículo en línea del 2020, el Director científico tecnológico de Eurecat, Daniel Casellas, observa que la rama de conformado de chapas enfrenta desafíos emergentes vinculados a la producción de componentes de alto rendimiento mediante nuevos materiales de chapa de alta resistencia. En particular, la anticipación de defectos durante el conformado, como grietas, distensiones desiguales o disminuciones locales, constituye una preocupación relevante. Aunque se han implementado diversas estrategias para abordar estos problemas, a pesar de los avances logrados, la utilización de materiales de chapa de alta resistencia sigue planteando un reto significativo para el sector manufacturero. Este enfrenta dificultades sustanciales para garantizar una calidad del 100% en su producción, lo que resulta en pérdidas de producción debido a la aparición de defectos y una falta de conformidad global en relación con estos nuevos materiales. [8]

Por otro lado, el Dr. Enrique Cabrero, Director general del Conacyt, menciona que la industria de fabricación de moldes y troqueles en México presenta perspectivas significativas de expansión para satisfacer las demandas de los sectores aeroespacial, automotriz y de electrodomésticos. La importación y reparación de moldes están generando inversiones de considerable cuantía, razón por la cual muchas empresas buscan proveedores locales. [9]

Basado en un informe del Foro Consultivo Científico y Tecnológico (FCCYT) titulado "Diseño y Desarrollo de productos y procesos de alto valor agregado", México realiza importaciones que superan los 18,000 millones de dólares en maquinaria destinada a procesos manufactureros y productivos, además de más de 2,600 millones de dólares en moldes, troqueles y herramientas. [9]

1.2 Conceptos fundamentales

1.2.1 Comportamiento elástico y plástico

Una deformación elástica aplicada a un material sólido modifica su forma geométrica, pero al remover las fuerzas, el material retorna a su forma original. En otras palabras, el estado elástico ocasiona deformaciones reversibles. Para inducir un comportamiento plástico en un material, es necesario inicialmente someterlo a deformaciones elásticas y luego alcanzar un punto de transición. Una vez superado este punto, una fracción de la deformación total permanece de manera irreversible en el material, y solo la deformación elástica se recupera cuando se eliminan todas las cargas externas. [3]

Para los materiales metálicos, la aproximación elástica lineal se puede usar con gran precisión. Para un material anisotrópico general, la ecuación constitutiva se escribe como:

$$\sigma = C: \epsilon^{El} \quad (1)$$

donde σ es el tensor de esfuerzos, \mathbf{C} el tensor de rigidez (con rango 4) y ϵ^{El} el tensor de deformación elástica. Si bien los materiales conformados mediante un proceso de laminado poseen una simetría ortotrópica, la anisotropía elástica se desprecia, ya que tiene un efecto limitado comparada con la anisotropía plástica. [10]

1.2.2 Origen cristalino de la deformación plástica

El descubrimiento de la difracción de rayos X por Laue en 1912 permitió demostrar la naturaleza cristalina de los metales. Mediante experimentos sobre monocristales metálicos cuidadosamente preparados, se observaba que la deformación plástica se genera en forma de un deslizamiento sobre un número de planos limitados, con dos o tres direcciones de deslizamiento en cada plano. A esta combinación de planos y direcciones se le conoce como sistemas de deslizamiento.

La ley de Schmid explica que el deslizamiento en un monocristal depende de la magnitud del esfuerzo cortante por cargas externas, de la estructura cristalina y de la orientación de los sistemas de deslizamiento respecto al esfuerzo cortante alcanza un valor llamado esfuerzo cortante crítico. [11]

Se considera un monocristal con área transversal A (Figura. 1.1). el ángulo entre el plano normal al plano de deslizamiento y el eje del monocristal es ϕ , mientras que el ángulo entre el plano de deslizamiento con el eje del monocristal es λ . El área del plano de deslizamiento con la inclinación es entonces $A/\cos\phi$, y el componente de carga que actúa sobre el plano de deslizamiento es $F \cos\lambda$. Por lo tanto, que el esfuerzo cortante crítico se calcula de la siguiente manera:

$$\tau_{CRSS} = \frac{F \cos\lambda}{\frac{A}{\cos\phi}} = \frac{F}{A} \cos\phi \cos\lambda \quad (2)$$

Con F la magnitud de la fuerza de tracción que se ejerce sobre el eje de la probeta.

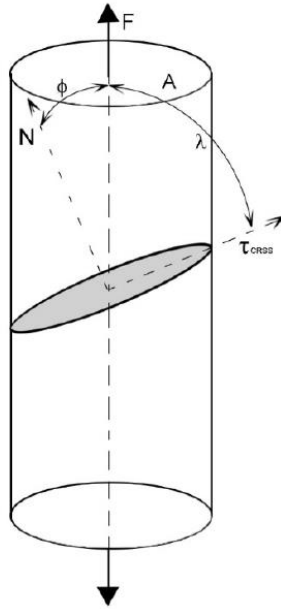


Figura 1.1 – Geometría que describe la ley de Schmid. [11]

La ley de Schmid se formuló originalmente para un estado de esfuerzo uniaxial. Sin embargo, Definiendo la dirección perpendicular al plano de deslizamiento como **n** y la dirección de deslizamiento como **b** (ambos son vectores unitarios), se encuentra que:

$$\tau_{res} = (\mathbf{b} \mathbf{n}) : \boldsymbol{\sigma} \quad (3)$$

Aquí, la anotación **b n** indica un producto tensorial, es decir, el término entre paréntesis es un tensor de rango 2 conocido como tensor de Schmid:

$$\mathbf{M}_s = \mathbf{b} \mathbf{n} \quad (4)$$

Esta observación es importante. Los sistemas de deslizamiento siempre se definen con respecto a un sistema de referencia que pertenece al cristal. Para materiales cúbicos, este sistema corresponde a las aristas de la celda unitaria.

1.2.3 Textura y anisotropía

La orientación cristalográfica, ilustrada en la Figura 1.2, refleja la rotación existente entre un sistema de referencia externo (el sistema de referencia de la muestra) y un sistema de referencia vinculado al cristal (el sistema cristalino). En el caso del sistema cúbico, las direcciones naturales de los ejes son [100], [010] y [001]. Este principio se aplica a todos los sólidos cristalinos, incluyendo minerales, cerámicos, superconductores y metales. En la mayoría de los materiales, se observa una orientación preferencial debido a procesos de fabricación como la fundición o el laminado, y se conoce como textura cristalina. [12]

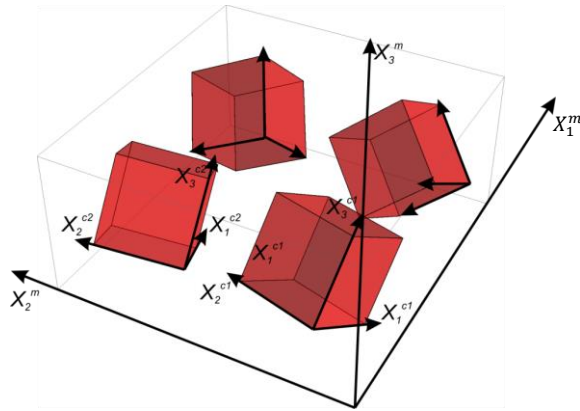


Figura 1.2 - Sistemas de referencia para plasticidad policristalina.
 (Los ejes con superíndice m refieren al sistema de referencia exterior (muestra), los superíndices c_i refieren a los ejes de coordenadas para el (mono)cristal número i en el policristal).

Para describir una orientación, es necesario establecer un par de sistemas de referencia: uno asociado a la muestra (S : S_1, S_2, S_3) y el otro, a las direcciones cristalográficas (C : C_1, C_2, C_3). Para relacionar ambos, existe una matriz de rotación que describe la orientación con respecto al sistema de referencia de la muestra, que se suele indicar con el símbolo \mathbf{g} . Estrictamente dicho, \mathbf{g} es el tensor de cosenos directores del sistema cristalino con respecto al sistema de la muestra.

El tensor \mathbf{g} es ortonormal. Dado que solo se requieren tres parámetros de la matriz para especificar la orientación, el método más utilizado para expresar estos tres números es mediante los ángulos de Euler (Figura 1.3). Estos ángulos se definen como sigue:

1. Se aplica una rotación sobre un ángulo φ_1 con respecto al eje X_3 . La matriz de esta rotación se puede indicar como \mathbf{T}_3 .
2. Se aplica una rotación sobre un ángulo Φ con respecto al nuevo eje X_1 , con matriz \mathbf{T}_1 .
3. Se aplica una rotación sobre un ángulo φ_2 con respecto al nuevo eje X_3 .

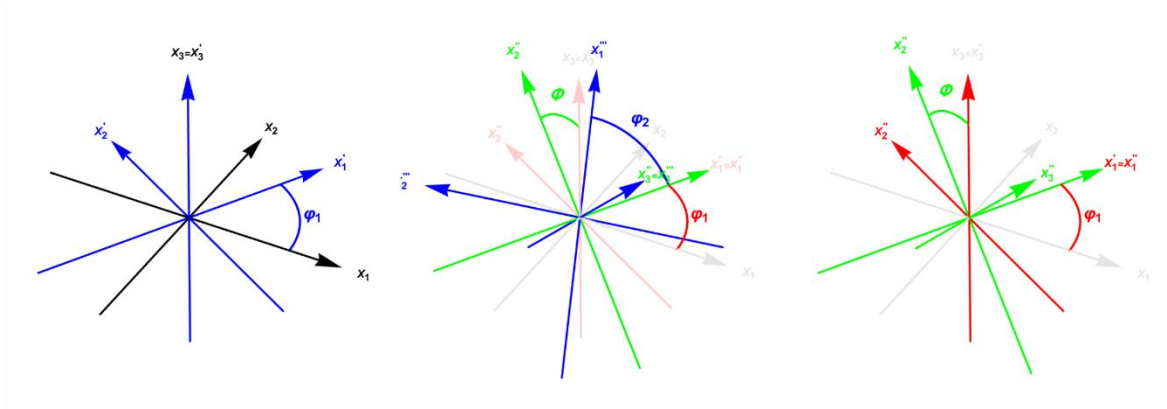


Figura 1.3 - Definición de los ángulos de Euler mediante tres rotaciones consecutivas.

La rotación total, denominado \mathbf{g} , se encuentra mediante la composición de las tres rotaciones mencionados como:

$$\mathbf{T}_3: \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{T}_1: \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (6)$$

Visto que un tensor no puede ser igual a sus componentes, en vez del signo “=” (es igual a), se utiliza el signo “:” (tiene como componentes). Multiplicando estas matrices, se obtiene:

$$\mathbf{g}: \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & \cos \varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Phi & \sin \Phi \\ 0 & -\sin \Phi & \cos \Phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

o:

$$\mathbf{g}: \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \Phi \sin \varphi_1 \sin \varphi_2 & \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + \cos \Phi \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 & \sin \Phi \sin \varphi_2 \\ -\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 - \cos \Phi \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 & -\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \Phi \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 & \sin \Phi \cos \varphi_2 \\ \sin \Phi \sin \varphi_1 & -\sin \Phi \cos \varphi_1 & \cos \Phi \end{pmatrix} \quad (8)$$

1.2.4 Homogenización

Lo anterior implica que cada grano de un policristal tiene propiedades diferentes ante un campo de deformaciones impuesto por un proceso de conformado. Para poder hacer un análisis de medio continuo, es indispensable calcular el comportamiento colectivo de todos los granos juntos. A este proceso se le denomina homogenización. El primer intento para aplicar una homogenización para predecir

el comportamiento mecánico de un policristal se conoce como la aproximación de Sachs.

Ésta se basa en la postulación (aproximación) de que todos los granos del cristal estén sujetos al mismo estado de esfuerzos σ . Considerando que se conoce el tensor de Schmid para un monocristal en el sistema de referencia cristalino, se puede calcular el esfuerzo resuelto sobre los sistemas cristalinos mediante la rotación del tensor de Schmid del grano número i para representarlo en el sistema de referencia de la muestra:

$$\tau_{res} = (\mathbf{g} \cdot \mathbf{M}_s^i \cdot \mathbf{g}^T) : \boldsymbol{\sigma} \quad (9)$$

Al incrementar la magnitud de σ , en cada grano existirá un sistema (de doce disponibles) que alcance primero el esfuerzo crítico resuelto y el grano empieza a deformarse plásticamente. El nivel promedio de los esfuerzos luego se toma como el esfuerzo de cedencia del material. El problema con el método de Sachs es que no toma en cuenta que gradualmente, múltiples sistemas dentro del mismo grano rebasarán el esfuerzo crítico resuelto y no toma en cuenta el endurecimiento por trabajo en frío.

El criterio de Taylor postula que todos los granos son sujetos al mismo tensor de deformación y que éste es igual a la deformación de la muestra, es decir, $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{ci} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^M$. Esto es el primer criterio de Taylor. Tomando en cuenta que un tensor de deformación plástica es simétrico y su traza es 0, se concluye que sólo se pueden elegir cinco elementos de este tensor de manera independiente. En consecuencia, cualquier tensor de deformación plástica se puede escribir como una combinación lineal de 5 tensores de Schmid para un cristal dado:

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{ci} = \sum_{\alpha=1}^5 \dot{\gamma}^{\alpha} \mathbf{M}_s^i \quad (10)$$

Aquí $\dot{\gamma}^{\alpha}$ es la velocidad de deslizamiento para el sistema de deslizamiento n° α . Para el aluminio, con sus 12 sistemas de deslizamiento, se puede cumplir con esta ecuación de $\binom{12}{5}=792$ maneras. El segundo criterio de Taylor postula que se activará aquella combinación de sistemas de deslizamiento que minimice la potencia plástica disipada:

$$\dot{W} = \sum_{\alpha=1}^5 \dot{\gamma}^{\alpha} \tau_c^{\alpha} \quad (11)$$

Existen métodos numéricos muy eficientes para encontrar la combinación de sistemas de deslizamiento que cumple con el segundo criterio de Taylor.

El uso directo de las ecuaciones (10) y (11) lleva a lo que se conoce como “full constraints” Taylor (FC Taylor). Históricamente, se ha intentado de relajar la condición (10), generando “relaxed constraints” Taylor. El caso más exitoso de

relajación consiste en estudiar dos granos, que en conjunto cumplen con la condición (10) pero que tienen la libertad de deslizamiento en su límite de grano. Con esto, se toma en cuenta la interacción entre los granos en el material. Este método, originalmente denominado “Advanced Lamel” se conoce más comúnmente como ALAMEL. Los detalles de este método se describen en la literatura especializada [13] y no forman parte de este estudio.

1.2.5 Criterios de cedencia

Un criterio de cedencia es una función escalar que depende de todos los componentes del tensor de esfuerzos y que expresa, para un tensor σ dado, si el material está en un estado elástico o plástico.

$$\begin{cases} f(\sigma) < k^2 & \text{Comportamiento elástico} \\ f(\sigma) = k^2 & \text{Comportamiento plástico} \end{cases} \quad (12)$$

El signo $>$ no se contempla, ya que, una vez alcanzado el límite elástico, la energía adicional agregada se disipa como calor. Si se almacena energía interna a través de un cambio de la subestructura (arreglos de dislocaciones), se habla de endurecimiento por trabajo en frío. En este caso, el valor de k incrementa, conservando la igualdad en la fórmula (12). [14]

En materiales metálicos, que se deforman mediante mecanismos de deslizamiento de planos sobre sistemas de deslizamiento establecido, se puede demostrar que la deformación plástica no se asocia a ningún cambio de volumen. Asimismo, la deformación plástica no se ve afectado por la presión hidrostática. Por lo tanto, se puede sustituir el símbolo σ por \mathbf{s} , el desviador de esfuerzos. Considerando que el desviador de esfuerzos es simétrico y que su traza es 0, sólo se pueden elegir cinco de sus componentes de manera independiente. Por lo tanto, la expresión:

$$f(\mathbf{s}) \leq k \quad (13)$$

describe un lugar geométrico en un espacio de 5 dimensiones. El signo “ $<$ ” refiere a un punto dentro del lugar geométrico (estado elástico) y el signo “ $=$ ” corresponde a una superficie en el hiperespacio. Considerando que el estado elástico se puede describir tanto en términos de deformaciones como de esfuerzos, se puede describir el lugar geométrico también en términos de deformaciones. Esto se conoce como la dualidad entre deformación y esfuerzo. Como la energía elástica se almacena de manera reversible, se puede describir mediante una función potencial. En el estudio avanzado de la teoría de la plasticidad, se habla de las funciones $\Phi(\mathbf{s})$ y $\Psi(\epsilon)$ como potenciales plásticos duales.

El lugar geométrico de fluencia más usado corresponde al criterio de Von Mises. Éste se puede escribir como:

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \sqrt{\frac{1}{6}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2))} \quad (14)$$

El término debajo de la raíz cuadrada es la segunda invariante del desviador de esfuerzos, expresada en términos de los componentes de $\boldsymbol{\sigma}$. En consecuencia, el criterio de Von Mises impone un comportamiento isotrópico. Hill propuso un criterio que permite tomar en cuenta la anisotropía plástica:

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = \sqrt{F(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + H(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{23}^2 + 2N\sigma_{31}^2} \quad (15)$$

Los parámetros empíricos F a N se tienen que determinar mediante ensayos mecánicos. Se ha encontrado que el criterio de Hill no tiene la flexibilidad para poder modelar la mayoría de los materiales laminados.

Un análisis de la ecuación (15) muestra que el término debajo de la raíz es un polinomio homogéneo de segundo grado en todos los componentes del tensor \mathbf{s} . Esto ha introducido el uso de polinomios de mayor grado para aproximar el lugar geométrico de la fluencia. A mayor grado, el polinomio cuenta con más parámetros, y, por lo tanto, la geometría se puede describir con más detalle. Por el otro lado, conforme hay más parámetros, se requieren de más experimentos para determinar su valor, y la complejidad de estos experimentos incrementa.

Lo anterior justifica el método HMS, donde se determinan los parámetros del lugar geométrico de la fluencia mediante experimentos virtuales, basados en la implementación de alguna de las versiones del método de Taylor. Visto que el método de Taylor toma las deformaciones como dato de entrada, se obtiene un lugar geométrico dual.

La función potencial FACET [15] es un polinomio homogéneo de grado 6 o de grado 8, como se muestra en la Ecuación (16) en su versión para materiales insensibles a la velocidad de deformación.

$$\Psi(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}) = [G_n(\dot{\boldsymbol{\epsilon}})]^{1/n} \quad (16)$$

Donde

$$G_n(\dot{\boldsymbol{\epsilon}}) = \sum_{k=1}^K \lambda_k (S_{kp} \dot{\epsilon}_p)^n \quad (17)$$

El índice p va de 1 a 5, enumerando las cinco componentes linealmente independientes del tensor rapidez de deformación; λ_k y S_k son parámetros para el ajuste de los puntos de la sección 2D del lugar geométrico de la fluencia, donde $\lambda_k \geq 0$; y el exponente n es un múltiplo de 2, donde generalmente se utiliza 6 u 8. $G_n(\dot{\boldsymbol{\epsilon}})$ es un polinomio homogéneo de orden n .

1.2.6. Los ensayos virtuales.

En vez de recurrir a una serie de ensayos mecánicos, HMS utiliza la textura medida del material para analizar la anisotropía. Para esto, se seleccionan 5000 orientaciones representativas de la ODF. Éstas se usan para los modelos FC-Taylor y ALAMEL.

Luego, se define un modo de deformación, es decir, un tensor desviador puro con magnitud 1. Para este tensor, se calcula el factor de Taylor, tomando en cuenta el promedio de los 5000 granos. Al multiplicar el modo de deformación con el factor de Taylor y el esfuerzo de cedencia medido en un ensayo de tracción, se obtiene un tensor de esfuerzos que corresponde a la transición elástica-plástica.

Este procedimiento se repite para cubrir todo el espacio en 5 dimensiones mediante modos de deformación que cubren el espacio de manera aproximadamente uniforme. Esto involucra la ejecución de varios miles de simulaciones de Taylor. Mediante un método de mínimos cuadrados, se buscan los coeficientes del polinomio homogéneo (Ecuación 17) para ajustarse a las simulaciones individuales. El procedimiento completo se puede ejecutar en cuestión de segundos en una estación de trabajo moderna.

La textura cristalográfica cambia conforme procede la deformación plástica. Por lo tanto, existe la posibilidad de actualizar el lugar geométrico de la fluencia durante el ensayo. Como la deformación no es homogénea en toda la pieza durante un proceso de conformado, esta actualización se tiene que ejecutar para cada nodo del modelo. Esto incrementa de manera considerable el tiempo de cómputo. No obstante, la posibilidad de tomar en cuenta la evolución de la textura durante el proceso es una de las ventajas del método HMS. [16]

1.2.7. Subrutina de usuario

ABAQUS permite definir comportamientos mecánicos que no fueron contemplados en la paquetería comercial. Para ABAQUS Explicit, esto se hace mediante subrutinas llamadas UMAT, en ABAQUS Implicit, estas subrutinas se conocen como VUMAT. La programación de este tipo de subrutinas no es objeto de esta tesis.

La VUMAT definida para el criterio de fluencia FACET contiene todo el código requerido para el uso de este formalismo. Particularmente, ABAQUS requiere que los criterios de fluencia se expresan en términos de esfuerzos, mientras el método de Taylor requiere utilizar velocidades de deformación. La transición a la forma dual del criterio FACET forma parte de la subrutina. [16]

Además, el VUMAT tiene la capacidad para comunicarse con la paquetería de ensayos virtuales. Esto permite actualizar la textura y el lugar geométrico de la

fluencia después de un determinado incremento de deformación. Este incremento, en términos de deformación equivalente, típicamente es del 2%.

1.3 Modelado

1.3.1 Función del modelado

Los recursos de modelado y simulación ofrecen un contexto para examinar la dinámica del sistema analizado en diversas condiciones operativas, empleando modelos continuos, discretos o combinados para su representación. Cuando se aplican de manera adecuada, estas técnicas pueden agilizar el proceso de diseño, la evaluación de opciones, la predicción, la experimentación con estrategias, la verificación de hipótesis, el entrenamiento y la toma de decisiones. [17]

Esto debería posibilitar la obtención, en función de la situación, una optimización más efectiva de los recursos disponibles, un aumento en los rendimientos del proceso productivo, una mejora en la organización o comprensión de los procedimientos. Todo esto resulta esencial para alcanzar un nivel competitivo adecuado en un contexto de producción y servicios fuertemente influenciado por la globalización de las actividades económicas.[17]

Las estrategias convencionales de optimización, mayormente categorizadas dentro del ámbito de la investigación operativa, han sido históricamente la principal aproximación para enfrentar los desafíos de la gestión operativa en sistemas logísticos y de producción. Actualmente, estos sistemas han sido equipados con los mecanismos requeridos para adaptarse a un mercado que busca una notable flexibilidad tanto en los volúmenes de producción como en la diversidad de productos. [17]

1.3.2 Método de elemento finito

La simulación computacional se utiliza ampliamente en las empresas para hacer análisis y mejorar la calidad de los productos y proyectos. La mayoría de esos análisis se llevan a cabo mediante uso de paquetería que utiliza el **método de elementos finitos**, lo cual permite obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

La geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia. El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener

diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales, como se observa en la Figura 1.4. Al conjunto completo – elementos y nodos – se le denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis.

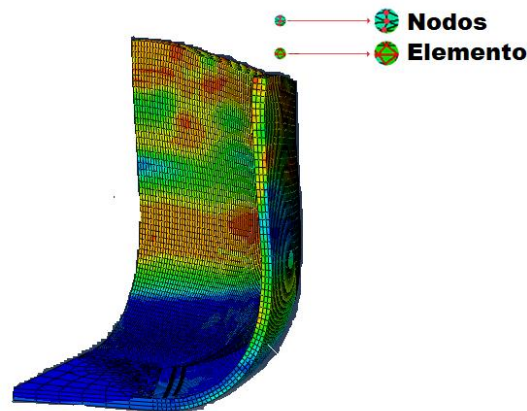


Figura 1.4 - Nodos y elementos de una malla.

1.3.3 Modelado multi-escala

El software jerárquico multi-escala (HMS), es un código de elementos finitos de plasticidad policristalina desarrollado en KU Leuven con el objetivo principal de proporcionar una solución computacional factible para predecir el comportamiento plástico anisotrópico. Una de las características principales de HMS es la implementación del método FACET, así como los modelos multi-escala ALAMEL y FC Taylor (de los cuales no se profundizará en esta tesis), utilizando una textura inicial del material representada por una Función de Distribución de Orientaciones (ODF) discreto con 5000 granos, cada una con una orientación representativa de los granos del material estudiado.[16]

Con los modelos ALAMEL o FC Taylor y los datos de la textura inicial se obtiene el lugar geométrico de la fluencia que describe el estado inicial del material de forma discreta. Los coeficientes desconocidos de la función Facet se obtienen con los

datos del lugar geométrico de la fluencia previamente calculado, considerando la ley de endurecimiento, Voce o Swift. Por último, HMS permite actualizar la textura, lo que provoca una renovación del lugar geométrico de la fluencia progresivamente.

La evaluación de la textura es una ventaja importante que presenta este modelo, debido a que permite reflejar los cambios de la orientación de la red cristalina de los granos en la estructura del material lo que indica de una forma específica como cambia el material a lo largo de la simulación. Esto permite incorporar la anisotropía de los materiales. [16]

1.4 Proceso de troquelado

El troquelado es un proceso mecánico de producción industrial que se utiliza para trabajar en frío lámina metálica y fabricar, de forma completa o parcial, piezas por una herramienta denominada troquel, conformada por un punzón y una matriz o dado, también llamados 'macho' y 'hembra'.

A través de una prensa, el troquel aplica presión sobre el material, superando su límite elástico para llevar a cabo diversas acciones como cortar, doblar o transformar una lámina plana en una geometría tridimensional mediante el proceso de embutido. [18]

El troquel es una herramienta utilizada en una prensa, ya sea mecánica o hidráulica, para realizar operaciones de corte, doblado y embutido en láminas de acero. Los componentes básicos del troquel se dividen de la siguiente manera como se representa la *Figura 1.5*.

- a) **PORTA PUNZÓN:** Placa superior. Parte tenaz que aloja al macho y contiene una placa sufridera.
- b) **POSTES GUÍA:** Permiten la alineación de manera correcta entre el punzón y la matriz.
- c) **PUNZÓN:** Ejerce presión sobre la lámina a troquelar, embutiéndola gracias al claro existente entre éste y la matriz.
- d) **PISADOR:** Impide el movimiento de la lámina antes de realizar el embutido y garantiza su correcta ubicación con respecto a la hembra y el macho.
- e) **MATRIZ:** Parte templada y revenida que impide las posibles imperfecciones o mordeduras producidas por los continuos golpes o impactos que suceden durante el embutido, ubicada generalmente en la mesa o parte inferior de la troqueladora. La parte inferior de la matriz sirve como estructura y tiene una cavidad que permite el alojamiento de las piezas embutidas y facilitar la salida de éstas.

- f) TORNILLOS GUÍA con RESORTES: Los tornillos guía sujetan al pisador a una distancia más baja que el punzón para que el pisador aprisione la chapa antes de que el punzón baje. Los resortes proporcionan la fuerza necesaria para impedir que la chapa a embutir se deslice libremente y sea de manera controlada evitando algunos defectos durante el proceso de embutido.
- g) PORTA MATRIZ: Placa inferior. Parte tenaz que contiene la placa sufridera o matriz.

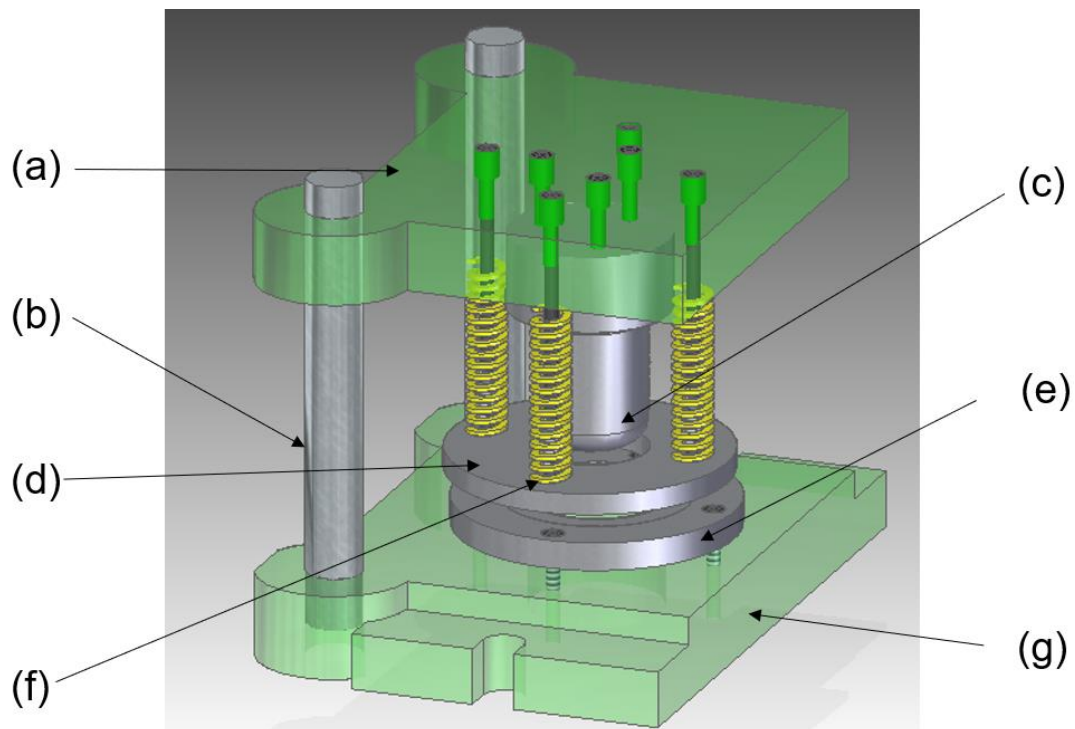


Figura 1.5 - (a) porta punzón, (b) postes guía, (c) punzón, (d) pisador, (e) matriz, (f) tornillos guía con resortes (g) porta matriz.

Como conclusión se puede decir que el troquelado es un proceso de transformación de la lámina metálica sin producir viruta, donde las operaciones más comunes que se pueden encontrar son:

- Corte.
- Doblado.
- Embutido.

1.4.1 Proceso de corte

La operación más común en el troquelado es el de corte, utilizado para desprender, separar o seccionar una parte del material de la lámina mediante cizallado con un punzón y la matriz; por su parte, en el punzonado, el troquel, por impacto, abre agujeros en la lámina.

La operación de los troqueles de corte se fundamenta en el principio de corte por cizalla. Este principio implica la concentración de fuerzas al atrapar la chapa y comprimirla entre dos bordes afilados. Cuando la presión aplicada supera la resistencia al corte de la lámina, se separa una sección del material, adoptando la forma definida por los bordes que llevaron a cabo el corte. [19]

El proceso de corte por cizallado consta de tres fases (ver Figura 1.6). En la primera fase, se produce una deformación plástica en la superficie de la lámina sin que se produzca un desgarro del material. La segunda fase implica la penetración, donde el material se comprime y comienza el corte. Por último, en la tercera fase (etapa de fractura), se generan grietas cerca de los bordes afilados, extendiéndose hacia el interior de la lámina hasta alcanzar el lado opuesto. [1]

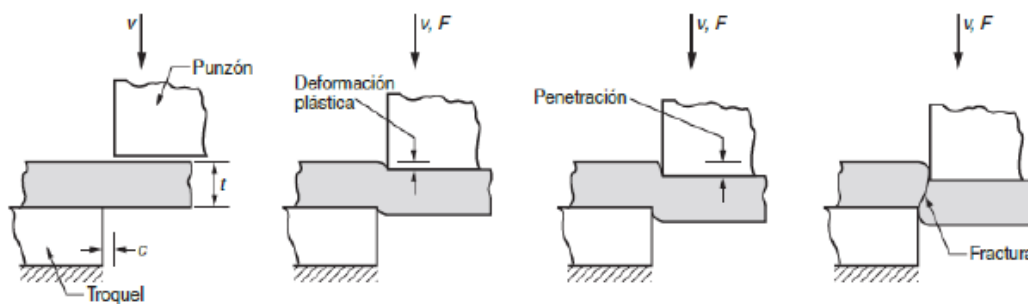


Figura 1.6 – Fases del proceso de corte por cizalla. [1]

Como resultado del proceso de corte, se generan cuatro zonas en los bordes de la pieza desprendida con diferentes características, dichas zonas se muestran en la Figura 1.7.



Figura 1.7 – Zonas en los bordes, 1) redondeado, 2) bruñido, 3) fractura, 4) rebaba. [1]

La calidad del producto depende en gran medida del tamaño de la zona de rebaba, ya que en la mayoría de los casos es necesario retirar dicha porción del material en procesos posteriores. Por lo tanto, un proceso que reduzca el tamaño de rebaba podría, incluso, no necesitar el proceso posterior, esto se logra principalmente con

una sección correcta del espacio que existe entre punzón y matriz (dicho espacio es conocido como claro u holgura).

Los procesos de corte por troquel se clasifican en dos grupos: corte y punzonado. En el troquelado de corte, se busca extraer la pieza objetivo del material original, es decir la geometría cortada es la pieza usada. El siguiente tipo de corte por troquel recibe el nombre de punzonado. Este proceso busca retirar una porción del material de la pieza útil. Es decir, se busca generar una perforación o hueco en la pieza útil o pieza final. Dichas operaciones se pueden observar en la Figura 1.8.

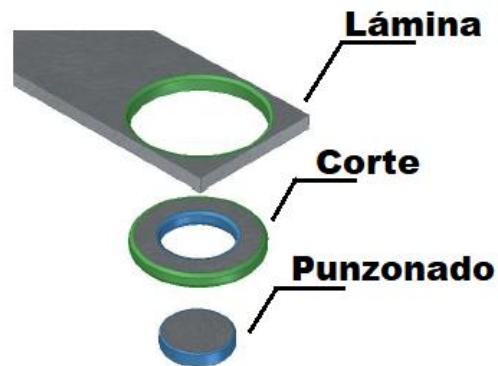


Figura 1.8 – Operaciones de corte. [1]

1.4.2 Proceso de embutido

El embutido se emplea como una técnica de conformado de láminas metálicas para fabricar piezas con formas cóncavas, cajas y otras formas huecas más complejas. Este proceso implica colocar una lámina de metal sobre la cavidad de un troquel y empujar el metal hacia dicha cavidad utilizando un punzón, según se ilustra en la Figura 1.9. Para asegurar que la forma se ajuste correctamente al troquel, se utiliza un sujetador de formas. Algunos ejemplos comunes de piezas producidas mediante el embutido incluyen latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y componentes para carrocerías de automóviles. [19]

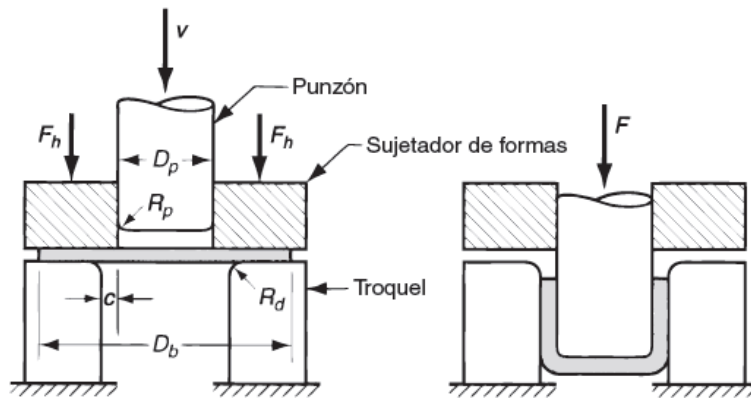


Figura 1.9 - Embutido de una pieza acopada. [19]

El embutido se emplea para crear formas cóncavas, el objetivo es conseguir, mediante la presión ejercida por una prensa, que el troquel deforme plásticamente la lámina o chapa de acuerdo con la forma de la matriz. La Figura 1.10 ilustra de forma sencilla el resultado del proceso de embutido.

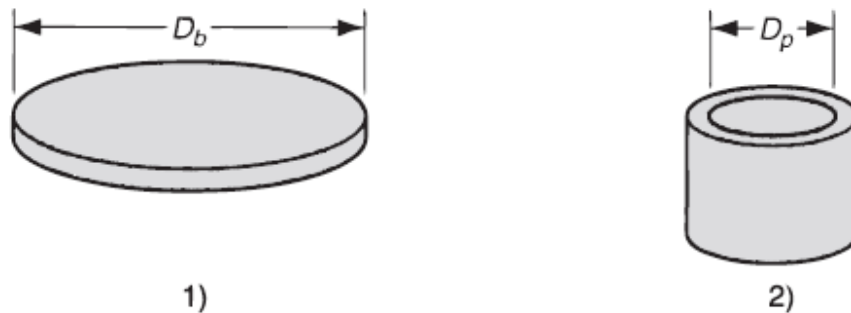


Figura 1.10 - Proceso de embutido; 1) Forma inicial, D_b =Diámetro inicial; 2) Pieza cóncava después de la operación, D_p =diámetro del punzón. [19]

Para realizar el trabajo de embutido, existen tres métodos:

- Embutido libre: Solo permite realizar piezas poco profundas. La altura del embutido es mucho menor que el diámetro del embutido.
- Embutido con sujetador o pisador: Este permite realizar piezas con mucha mayor profundidad. La altura de la pieza es igual o mayor que el diámetro de la pieza embutida.
- Embutido con sujetador y cojín en prensa: se usa para piezas irregulares con poca o gran profundidad.

Al realizar la operación de embutido es importante tomar en cuenta ciertos aspectos que determinar, si la operación que se desea se puede realizar. Dichos aspectos son:

- Propiedades mecánicas de la chapa.
- Cálculos para la operación de embutido.
 - Relación de embutido (DR).
 - Reducción (r).
 - Claro u holgura entre punzón y matriz (c).
 - Radio de la matriz (r_m).
 - Radio del punzón (r_p).
 - Fuerzas de embutido y pisador (F_e y F_p respectivamente).

El proceso de embutido implica la deformación mediante flexión y estiramiento entre matrices, abarcando acciones como curvar, plegar o enrollar. Los materiales empleados en el embutido en frío son aquellos que poseen ductilidad y maleabilidad, como el acero de baja aleación, las aleaciones de aluminio (preferiblemente sin cobre, pero con magnesio), el latón, la plata y el oro. [20]

La técnica de embutido en frío se lleva a cabo con el material a una temperatura que es inferior al 0.3 veces la temperatura de homologación (expresada en Kelvin). Este proceso generalmente se aplica a piezas con menor espesor en comparación con el trabajo en caliente, siendo comúnmente chapas o láminas de espesor uniforme. [20]

En la Figura 1.11 se muestra un troquel simple para realizar una operación de estampado en frío.



Figura 1.11 - Embutido en frío.

Por otro lado, el embutido en caliente se lleva a cabo cuando la temperatura del material a deformar supera la temperatura homóloga, y se le denomina embutido en caliente. Este proceso implica trabajar el material a una temperatura superior al 0.6 veces la temperatura homóloga (expresada en Kelvin). Aunque el producto resultante posee menor rugosidad y precisión dimensional en comparación con el trabajo en frío, ofrece la ventaja de lograr mayores deformaciones cuando se realiza en caliente (ver Figura 1.12). [20]

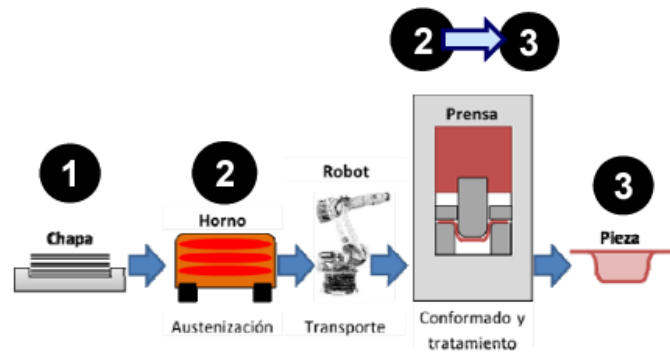


Figura 1.12 - Embutido en caliente. [21]

El embutido es ampliamente empleado en la industria para la producción de diversas piezas, especialmente en sectores como la industria automotriz (ver Figura 1.13), el transporte y la maquinaria agrícola. Algunos de los productos más comúnmente fabricados mediante este proceso son: [20]

- Piezas huecas.
- Puertas.
- Tapas de cajuelas de automóviles.
- Sistema de techos.
- Cubiertas.
- Bisagras de puertas.
- Chasis de automóviles.



Figura 1.13 - Monocasco de un automóvil.[20]

1.5 Mediciones

1.5.1 Celda de carga y sistemas de adquisición

Visto que la tesis cuenta con tres componentes (construcción del equipo, modelado y experimentación), se presentará un breve resumen de las técnicas de medición que al caso corresponden. Visto que la troqueladora es un equipo industrial, contrario a muchos equipos de laboratorio, no es evidente obtener datos durante el proceso. La pieza no se puede observar de manera completa durante el embutido y la velocidad del ensayo es mucho mayor de lo que se aplica en ensayos de laboratorio. Por el otro lado, la situación experimental corresponde mucho mejor a lo que ocurre en un proceso industrial.

Dada la dificultad de observar la pieza durante el proceso, las mediciones más evidentes son de las cargas durante el embutido. Para este fin se utiliza una celda de carga. Los tipos más comunes de celdas de carga son:

- Hidráulicas/Neumáticas.
- Galgas extensométricas.
- Piezoeléctricas.

En las celdas de carga hidráulicas y neumáticas, se mide la presión en un pistón, mismo que puede ser el actuador de un equipo. Visto que la troqueladora utilizada no tiene componentes de este tipo, no son sistemas adecuadas para este trabajo.

Las galgas extensométricas consisten en un conductor delgado colocado sobre una cinta polimérica que permite la colocación rígida sobre una superficie metálica. Cuando el cuerpo metálico se deforma, la galga se deforma con él. Esto resulta en un cambio de la longitud y sección transversal del conductor, y por ende de su resistencia eléctrica. El cambio de resistencia eléctrica se puede medir de manera muy precisa mediante un puente de Wheatstone.

Dada la gran variedad de geometrías que se pueden diseñar para la parte metálica de la celda de carga, se pueden medir cargas normales, de flexión y torque. Las dimensiones y la geometría del cuerpo sólido de la celda permiten variar la sensibilidad en rangos muy amplios. Sin embargo, las celdas basadas en galgas extensométricas tienen una mala respuesta ante cargas dinámicas y son sensibles a golpes, por lo que no se pueden utilizar en una troqueladora tipo industrial.

Las celdas de carga piezoeléctricas son menos versátiles que las basadas en galgas extensométricas, pero tienen una excelente respuesta dinámica y un rango de medición muy amplio. Se basan en un elemento piezoeléctrico que produce un

voltaje cuando esté sujeto a un cambio de geometría. Cuando se aplique una carga, el elemento piezoeléctrico se deforma. A través de un proceso de calibración, se asocia el voltaje generado con la carga aplicada durante la calibración.

Cada celda de carga requiere de un sistema de amplificación de la señal y un convertidor análogo-digital, así como una tarjeta de adquisición que sirva de interfaz con una computadora para registrar los resultados. Estos sistemas se pueden adquirir de manera independiente (por ejemplo, los sistemas de National Instruments) o pueden venir integrados como paquete en la adquisición de la celda. La primera opción brinda mayor flexibilidad, mientras la segunda garantiza una mayor facilidad de uso y compatibilidad de componentes.

1.5.2 Máquinas de coordenadas

Un escáner 3D es un dispositivo diseñado para registrar la geometría de un objeto con el fin de crear posteriormente un modelo tridimensional de dicho objeto. En otras palabras, tiene la capacidad de convertir un objeto físico en uno virtual, permitiendo su manipulación mediante computadoras y software especializado. Estos dispositivos tienen sus raíces en las máquinas de coordenadas que fueron introducidas en el siglo pasado con propósitos de control de calidad e ingeniería inversa. [22]

En su origen, las máquinas de coordenadas se basaron en tres ejes perpendiculares rígidos cuyo desplazamiento se podía medir con precisión micrométrica. Se operaban manualmente, colocando un palpador en la superficie por medir. Al primer toque del palpador, la máquina registraba la posición. Estos sistemas demostraban dos problemas principales.

El primero es la operación manual, que limita de manera severa la cantidad de puntos por medir. En geometrías complejas con curvas irregulares, esto impide el registro detallado de la geometría. Además, la operación humana induce un factor de errores. Este problema se resolvió utilizando las técnicas de CNC y control robótico, con lo que se incrementan los puntos medidos y se elimina el factor humano.

La segunda limitante de las máquinas de coordenadas originales es su apego al sistema cartesiano. Sin duda, este sistema permite la construcción de equipos rígidos de alta precisión, pero impone un limitante severo en términos de las geometrías medidas, ya que no puede medir en el interior de una pieza hueca o a través de geometrías muy irregulares en tres dimensiones. Este inconveniente se supera mediante el uso de brazos robóticos que cuenten con seis grados de libertad en sus articulaciones (tres de desplazamiento y tres de rotación). Estos brazos se pueden operar manualmente o de manera robótica. La primera aproximación es

apta para lotes pequeños con geometrías variadas, la segunda es óptima para control de calidad en lotes grandes con geometría constante.

Una mejora reciente es la sustitución del palpador mecánico por sistemas ópticos. Éstos pueden utilizar una gran variedad de principios físicos de la óptica, que son demasiado especializados para explicarse en esta tesis. En comparación con los palpadores, la cantidad de puntos que se puedan medir incrementa con un factor de cien a diez mil. Una aproximación híbrida es el uso de un palpador que establece puntos de referencia a intervalos regulares; el sistema óptico genera la malla de puntos intermedios para captar todos los detalles. Un problema del sistema óptico es la ocurrencia de reflexiones no deseadas o la falta de reflexión en algunas partes de la superficie. Se requiere de paquetería especializada para la eliminación de señales falsas y la reconstrucción digital del objeto analizado.

El uso de los escáneres 3D son variados y actualmente se utiliza en muchos sectores:

- Patrimonio: Conservación de obras de arte. Reproducción de esculturas.
- Ingeniería: Control dimensional, control de calidad, ingeniería inversa de piezas.
- Dental: Diseño de prótesis y estudios odontológicos.
- Arquitectura: Medición y planificación de edificios, levantamiento de planos.
- Arqueología: Estudio de yacimiento arqueológico. Reconstrucción de piezas.
- Topografía: Estudio de terrenos, minería. Trazados viales.

El "FaroArm" (Brazo Faro) es una máquina de medición por coordenadas portátil (MMC) que permite verificar fácilmente la calidad de productos llevando a cabo inspecciones 3D, certificaciones de herramientas, comparaciones CAD, análisis dimensionales, ingeniería inversa y más. El FARO Edge es el FaroArm más avanzado y vanguardista en la actualidad.

El FARO Laser Line Probe (LLP) brinda al ScanArm capacidades de escaneo 3D sin contacto excepcionales para realizar mediciones detalladas de formas superficiales. Esto convierte a la combinación de ambos en la opción ideal para una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) portátil, con la flexibilidad de operar tanto de manera táctil como sin contacto. El Edge, equipado con su computadora integrada de pantalla táctil y la tecnología "SmartArm", simplifica la experiencia del usuario al ofrecer mejoras en rendimiento, portabilidad y confiabilidad. [23]

CAM2 Measure 10 de FARO representa una paquetería versátil de metrología dimensional que atiende a usuarios que buscan una solución integral para diversas aplicaciones, abarcando tanto la medición táctil como el escaneo 3D sin contacto.

Esta paquetería es especialmente adecuada para tareas de inspección, tanto en entornos CAD como no CAD, así como para dimensionamiento y tolerancias geométricas (GD&T). Facilita la conexión de múltiples dispositivos de medición 3D de FARO en un mismo sistema de coordenadas, permitiendo el escaneo simultáneo de varios equipos en un solo programa en una computadora. Esta capacidad posibilita a los usuarios escanear objetos de gran tamaño de manera eficiente. [23]

Capítulo 2. Descripción e instrumentación de los troqueles para el ensayo de embutido

2.1 Diseño de troqueles para el embutido de lámina de aluminio.

2.1.1 Diseño del troquel de corte

Antes de elaborar el troquel de corte, se estableció inicialmente el espesor de la lámina con la que se llevaría a cabo el trabajo, siendo este de 0.85 mm. Este valor es crucial para el diseño del troquel, ya que se utiliza para calcular el espacio, conocido como claro, entre el punzón (macho) y la matriz (dado o hembra). La fórmula siguiente se emplea para determinar este espacio. [24]

$$C_c = A_c t \quad (18)$$

Donde:

C_c : Claro troquel de corte (mm, in).

A_c : Tolerancia del material.

t : Espesor de la lámina (mm, in).

En la Tabla 2.1 se presentan los datos para determinar la tolerancia en función del material.

Tabla 2.1.- Tolerancia para el cálculo de claro, en función del material a trabajar. [19]

Grupo metálico	Ac
Aleaciones de aluminio 1100S– 5052S, todas las condiciones	0.045
Aleaciones de aluminio 2024T y 6061S, todas las condiciones; acero suave laminado en frío; acero inoxidable en frío.	0.060
Acero laminado en frío, dureza media; acero inoxidable, dureza media alta.	0.075

Una vez definido el espesor de la lámina, el siguiente paso es determinar el diámetro del disco a cortar, en nuestro caso, el diámetro del disco es de 85mm por lo que el diámetro de la matriz (D_{mc}) es igual al diámetro de la pieza que se quiere cortar. A continuación, el diámetro del punzón es el resultado de la resta de diámetro de la matriz menos el claro del troquel de corte, esto es: [25]

$$D_{pc} = D_{mc} - C_c \quad (19)$$

Donde:

D_{pc} : Diámetro del punzón

D_{mc} : Diámetro de la matriz

C_C : Claro del troquel de corte

Para el diámetro del pisador (D_{bc}) del troquel de corte es ligeramente mayor al diámetro del punzón, es decir, de 1 a 2mm, el pisador además de mantener la lámina sujeta durante el proceso de corte, este también funciona como botador del sobrante de lámina que queda introducida en el punzón.

Estas son las piezas principales del troquel de corte las cuales se muestran en la Figura 2.1, dichas piezas fueron maquinadas en acero herramental AISI-D2.

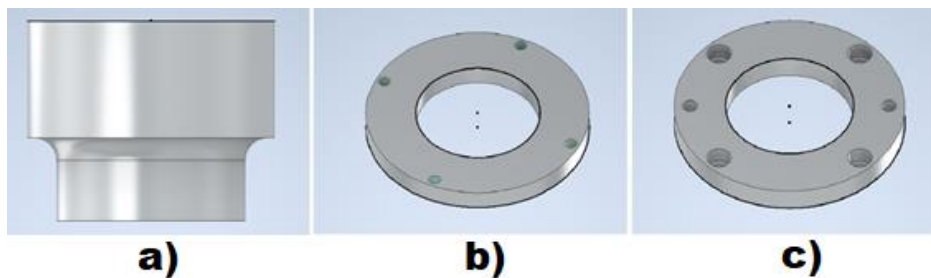


Figura 2.1 – Piezas principales del troquel de corte, a) Punzón de corte, b) Pisador, c) Matriz de corte.

Finalmente, en la Figura 2.2 se muestra el troquel de corte en su totalidad, con el resto de los elementos, espiga con celda de carga, porta punzón, tornillos con resortes y placa porta matriz.

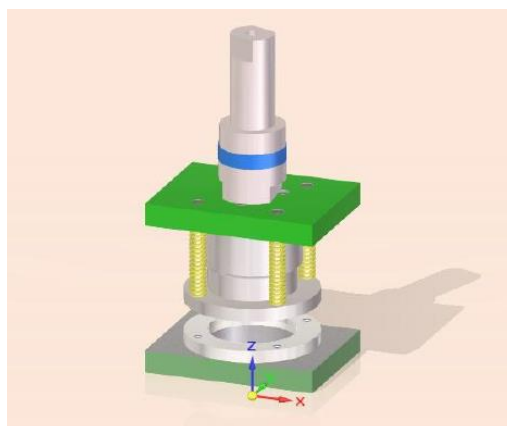


Figura 2.2 – Dibujo del troquel de corte ensamblado. [1]

2.1.2 Diseño del troquel de embutido

Del mismo modo, para la elaboración del troquel de embutido, se estableció previamente el espesor de la lámina que se emplearía. Este espesor se utilizó para determinar el espacio disponible en el troquel de embutido mediante la siguiente fórmula: [19], [24]

$$C_e = 1.1t \quad (20)$$

Donde:

C_e : Claro troquel de embutido.

t : Espesor de la lámina.

Las otras dimensiones del troquel, incluso el radio de curvatura por aplicar en la parte superior del punzón, se determinan por la norma ISO 11531 para la determinación de formación de orejas en aleaciones de aluminio. Estas dimensiones son:

D_{pe} = Diámetro del punzón = 50mm

R_{pe} = Radio del punzón = 10mm

D_{me} = Diámetro de la matriz = 52.2mm

R_{me} = Radio de la matriz = 4mm

Como se mencionó anteriormente, el diseño de los troqueles se realizó a partir del espesor de la lámina de aluminio con el que se trabajó para el modelo FEM de HMS, el cual es de 0.85 mm de espesor (t). Así mismo, como el troquel de embutido se diseñó de forma invertida, la guía de los discos a embutir se realizó en el pisador del troquel. Dichas piezas principales (punzón, pisador y matriz de embutido) se muestran en la Figural 2.3.

El material con el que se realizaron las piezas principales del troquel, punzón matriz y pisador es acero de grado herramental AISI-D2, el cual cuenta con alto contenido de carbono que puede alcanzar durezas de 60-65 HRC después de temple y revenido. Con un buen uso del herramental, esto garantiza una larga vida útil del mismo.

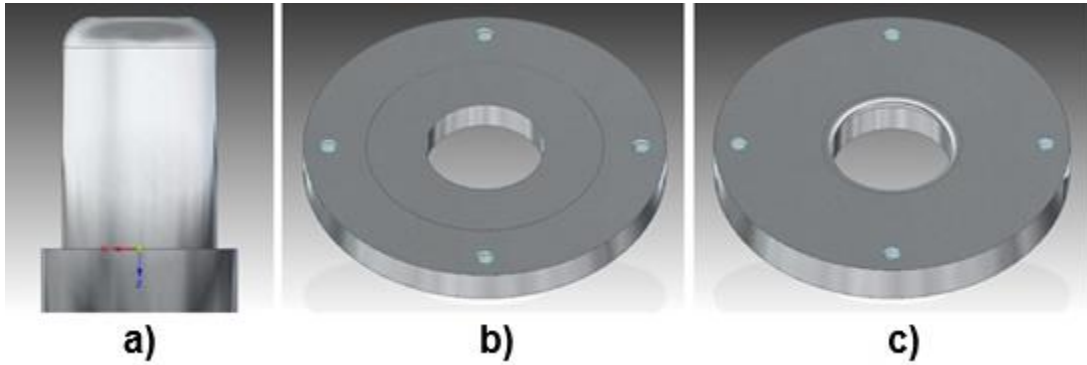


Figura 2.3 – Piezas principales del troquel de embutido, a) Punzón embutido, b) Pisador con guía, c) Matriz de embutido.

De igual forma que en troquel de corte, la figura 2.4 se muestra el troquel de embutido con todas sus piezas restantes como son; espiga con celda de carga, placa porta espiga, placa porta matriz, tornillos con resortes y placa porta punzón.

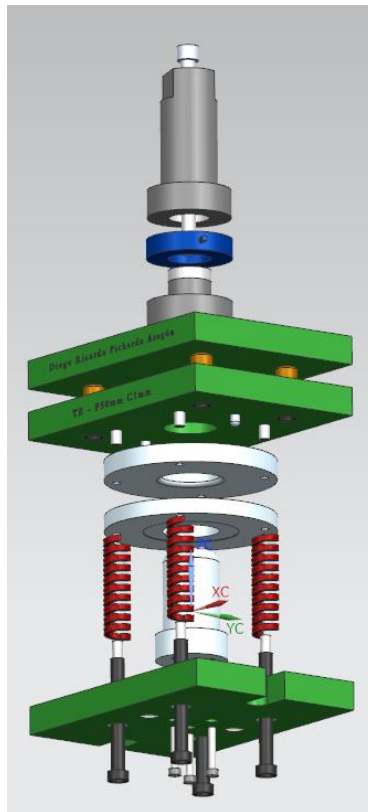


Figura 2.4 – Dibujo del troquel de embutido ensamblado.

2.2 Ensamble de los troqueles

2.2.1 Ensamble del troquel de corte

Para el ensamble del troquel de corte se ocuparon dos placas porta troquel, en una se colocó la matriz con un arreglo de 4 tornillos y 2 pernos de registros para asegurar que la matriz no pueda moverse durante la operación y en la otra placa se colocó el punzón con un arreglo de 3 tornillos a 120° cada uno y un arreglo de 4 tornillos guía con resortes para el pisador.

La matriz y punzón que se ensamblaron en las placas porta troquel fueron para recortar discos de 85 mm de lámina de Aluminio cuyo espesor es de 0.85mm. En la Figura 2.5 se muestra dicho ensamble de cada placa del portatroquel. En la Figura 2.6 se muestra el arreglo final del troquel de corte, donde se observa la letra F y una flecha, haciendo referencia de la cara frontal del troquel.



Figura 2.5 - Troquel de corte para discos de 85mm.

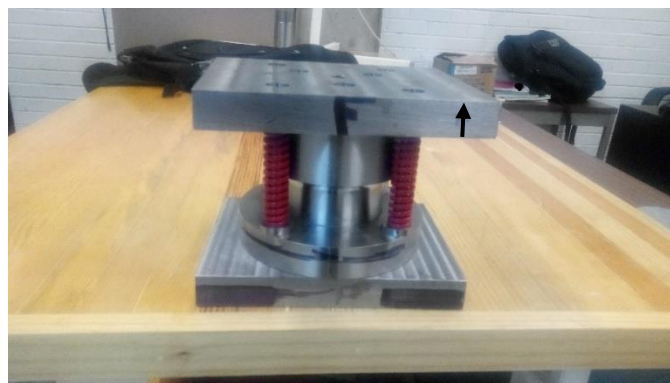


Figura 2.6 - Troquel de corte para discos de 85mm.

2.2.2 Ensamble troquel de embutido

A diferencia del troquel de corte, para el troquel de embutido se ocuparon 3 placas porta troquel. Como se mencionó anteriormente, este troquel se diseñó de forma invertida para una mayor comodidad del operador y así facilitar la obtención del producto sin necesidad de buscar la pieza final por la parte inferior de la maquina troqueladora, sino que el producto quede sobre el pisador después de realizar la operación.

La primera placa (porta espiga) consta de un barreno central con rosca de 1/2X13NS y cuatro barrenos con caja para conectar con la placa porta matriz. La placa porta matriz para el troquel de embutido, al igual que la placa porta matriz de corte, consta de 4 tornillos y 2 pernos de registros para garantizar que la matriz no se mueva en la operación, además de contar con 4 barrenos en las esquinas para conectar con la placa porta espiga. Para terminar, para ensamblar el punzón se utilizó un arreglo de 3 tornillos a 120° cada uno y cuatros tornillos guías con resortes para el pisador. Este arreglo se puede observar en la Figura 2.7.

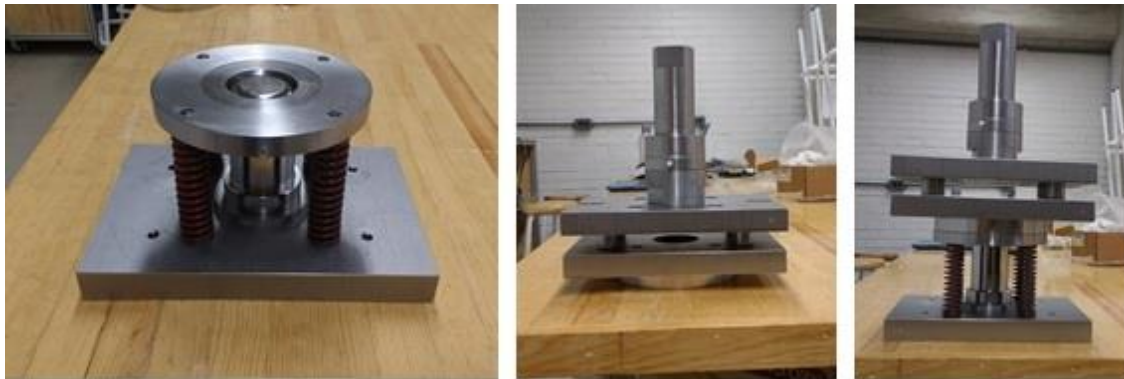


Figura 2.7 - Troquel de embutido.

2.2.3 Instalación de troqueles en la prensa mecánica.

Una vez ensamblados los dos troqueles (el troquel de corte y el troquel de embutido), se procede a la instalación de dichos troqueles a la prensa mecánica. En la Facultad de Ingeniería de la UNAM se cuenta con una prensa mecánica de la marca MEISTER como se muestra en la Figura 2.8.

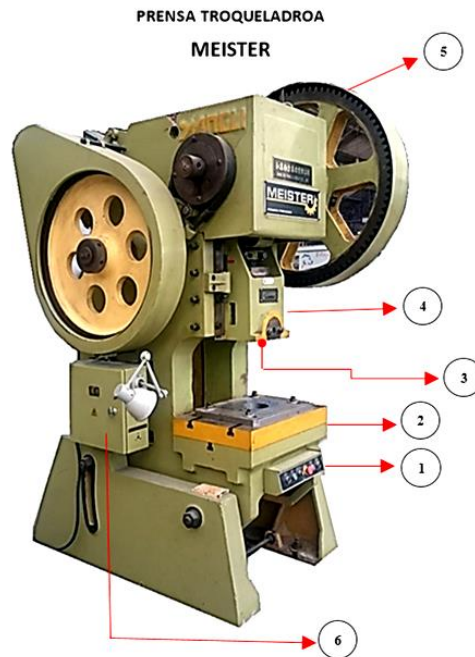


Figura 2.8 - Troqueladora MEISTER.

- 1.- Botones de mando.
- 2.- Mesa de trabajo.
- 3.- Cavidad para la espiga.
- 4.- Ariete de la prensa.
- 5.- Volante de inercia.
- 6.- Caja de control.

En la Tabla 2.2, se muestran las especificaciones de la prensa mecánica mencionada anteriormente, la capacidad de la prensa es de 63 T, permitiendo realizar las operaciones de corte y embutido, las cuales requieren aprox. 2 T.

Tabla 2.2 - Características principales de la troqueladora MEISTER.

Especificación	Unidades	Valor
Capacidad	Ton	63
Corriente	Amp	20
Motor principal	Hp	8
Interruptor principal	Amp	40
Peso total	Ton	4

La alineación del troquel es un factor muy importante en el proceso de troquelado, debido a que, si se presenta cualquier desperfecto o no se tiene el debido cuidado en el proceso, los herramientas pueden dañarse e incluso fracturarse tanto el troquel como elementos de la troqueladora.

En este trabajo se muestra una de las formas de alinear un troquel cuando no se cuenta con postes guía por problemas de espacio. Este es el caso de los troqueles que se utilizaron para hacer los ensayos:

- 1.- Asegurarse que la troqueladora se encuentre en modo de ajuste.
- 2.- Identificar la pieza ensamblada del troquel con la espiga instrumentada. Con la ayuda de un polín de madera en la bancada de la prensa, colocar la placa porta troquel superior en el polín.
- 3.- Alinear la espiga en la cavidad del ariete de la prensa, con la ayuda del tornillo de ajuste de carrera introducir la espiga en el ariete de la prensa.
- 4.- Apretar las tuercas de la muela del ariete con una llave o dado de 30 mm (de acuerdo con las características de la prensa que se encuentra en los talleres de Ingeniería Mecánica), y para brindar la sujeción de la espiga se deberán apretar cada tuerca media vuelta una y media vuelta la otra, hasta asegurarse de que la espiga se encuentre fija sin movimientos relativos.
- 5.- Colocar la placa porta troquel inferior al centro de la bancada de la prensa.
- 6.- Colocar los tornillos para sujetar y mantener en la posición alineada el punzón con la matriz. La Figura 2.9 se muestra el troquel de embutido alineado.



Figura 2.9 - Alineación del troquel de embutido.

Una vez que el troquel se encuentra alineado en la troqueladora se deberá realizar una serie de pruebas de forma manual en vacío y posteriormente con lámina para garantizar que el troquel está a punto para realizar la operación de manera correcta.

Estos pasos se utilizan tanto el troquel de corte como en el troquel de embutido, se requieren de ambos ya que el troquel de corte corta los discos, de diámetro de 85mm, que posteriormente el troquel de embutido va a deformar en el embutido.

Finalmente, se llevará a efecto la puesta en marcha de la troqueladora empleando la botonera de mando o el pedal para su operación. Este proceso se realiza para para ambos troqueles ya que es necesario cambiar el troquel dependiendo de la operación que se quiera realizar, en nuestro caso corte y/o embutido.

2.3 Equipo de medición de fuerzas

2.3.1 Configuración

Para realizar la medición de fuerzas del proceso de troquelado (en este caso, el proceso de embutido), se utilizó un equipo de medición de la marca **KISTLER**, el cual se muestra en la Figura 2.10

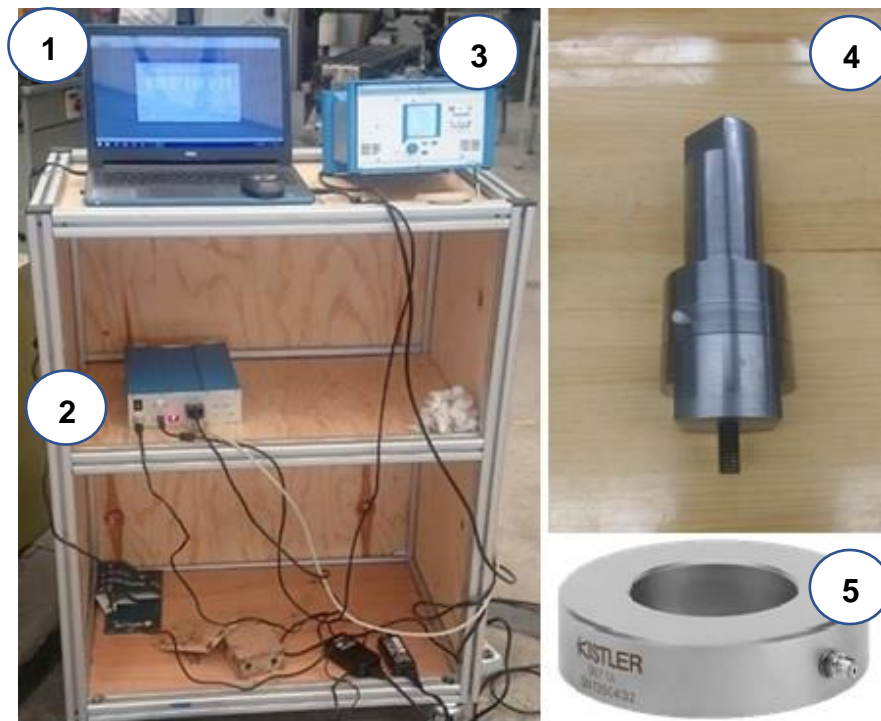


Figura 2.10 - Equipo de medición de fuerzas para troqueles.

- 1- Computadora.
- 2- Tarjeta de adquisición de datos Kistler (DAQ for DynoWareType 5697).
- 3- Amplificador de carga Multicanal Kistler (Type 5070).

- 4- Espiga instrumentada con la celda de carga Type 9107A.
- 5- Celda de carga (Type 9107A).

2.3.2 Modo de conexión del equipo

Como se mencionó anteriormente, el equipo de medición consta de una celda de carga (Tipo 9107A). Esta consta de materiales piezoeléctricos (genera una carga eléctrica cuando se deforma) y se encuentra presionada en la parte central de la espiga.

Esta celda de carga se conecta a un amplificador (amplificador de carga Multicanal Kistler type 5070) de señal debido a que la señal que manda la celda de carga es medida en pico coulomb, se requiere amplificar esa señal para que sea reconocida por la tarjeta de adquisición de datos (DAQ for Dynoware Type 5697) que codifique la señal para poder ser representada en una gráfica por una computadora. Por lo tanto, el siguiente paso es conectar el amplificador a la tarjeta de adquisición de datos. Por último, la tarjeta de adquisición de datos se conecta a un equipo de cómputo, en este caso una laptop que cuenta con los programas Instacal y Dynoware proporcionados por el proveedor del equipo de medición.

2.3.3 Calibración de la celda de carga

Para el buen funcionamiento de la celda de carga se requiere de una precarga especificada en la ficha técnica de la misma, la cual se encuentra en un rango de 80 a 200 kN, por lo que se realizaron los instrumentales para lograr dicha precarga, los cuales son: una espiga y una muela, haciendo que la celda de carga quede en medio de ambas piezas como se muestra en la Figura 2.11.

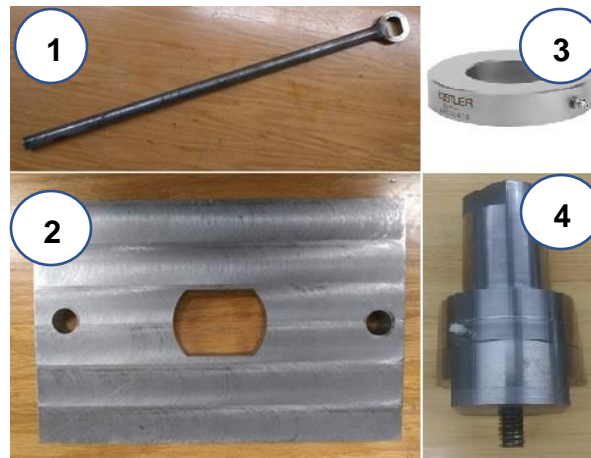


Figura 2.11 - Herramientas para la calibración de la celda de carga.
(1- Llave para apretar espiga, 2- Placa contra para apretar espiga, 3- Celda de carga, 4- Espiga con celda de carga en el centro).

Por último, para apretar la celda de carga y obtener la precarga, se manufacturaron una placa para empotrar en la prensa que funciona como contra y una llave que aprieta la espiga hasta el punto de llegar a la precarga. Estas herramientas se muestran en la Figura 2.12

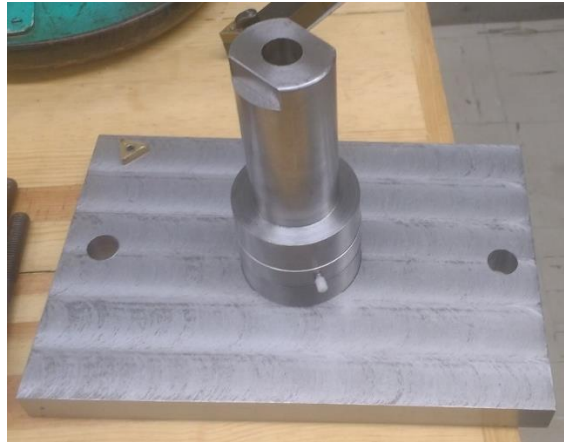


Figura 2.12 - Ensamble de la espiga con la placa para calibración.

2.3.4 Configuración de la paquetería por primera vez

Para comenzar a realizar las mediciones de fuerza de embutido se requieren realizar las siguientes configuraciones en los programas Instacal y Dynoware, respectivamente, realizando los siguientes pasos:

1. En la laptop se localiza y se abre el programa Instacal.
2. Se da doble click sobre la opción "Board #0- USB-2533- (serial #374911) y despliega la siguiente ventana (Figura 2.13), en esta ventana debe observar que los parámetros seleccionados sean los siguientes:

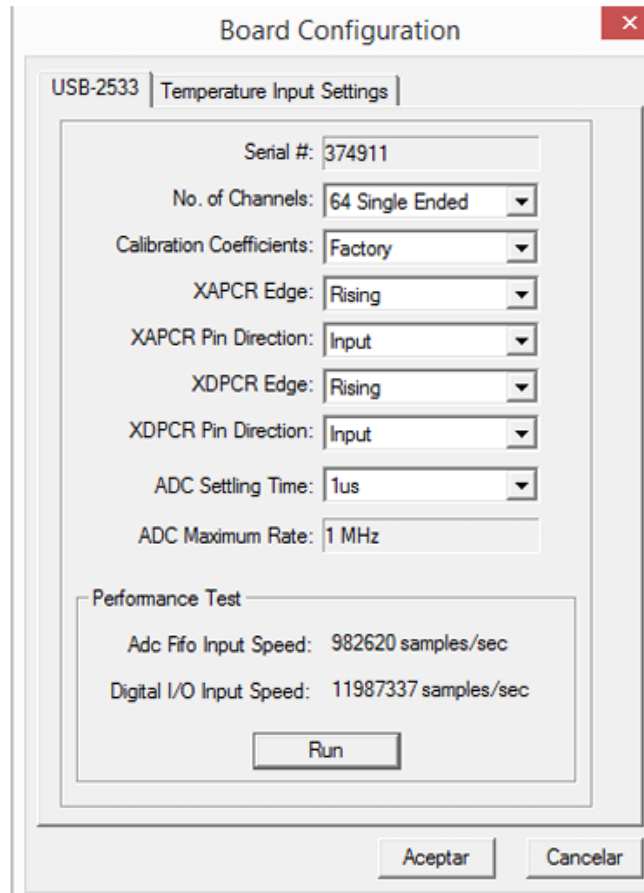


Figura 2.13 – Ventana de configuración inicial.

Estos parámetros son dados por el proveedor de la celda y se utilizan para que la tarjeta de adquisición de datos pueda reconocer y leer la información de que emite la celda de carga.

3. Se da Click sobre la opción “Run” de la ventana desplegada y se espera a que termine de cargar, cuando termine se da Click sobre la opción Aceptar y se minimiza el programa.
4. En la laptop se localiza y se abre el programa DynoWare para comenzar su configuración en el siguiente apartado.

2.3.5 Adquisición de datos con la prensa mecánica:

Una vez que se configura el programa “DynoWare” por primera vez, este servirá para comenzar más rápidamente la adquisición de datos, pues se debe repetir todos los pasos anteriores.

1. En el programa DynoWare se localizan 5 ventanas de color verde. Se encuentra del lado derecho de la opción “file open”.
2. Se localiza la primera ventana verde (de derecha a izquierda) “Hardware”, se da click sobre ella y se abre la siguiente ventana de diálogo.
3. En la ventana desplegada se revisa que se encuentren las siguientes opciones seleccionadas.
 - a) En la sub-pestaña “Label” se puede poner nombre a cada canal, nombrando “Z” al tercero, pero se debe verificar que se conectó de la celda de carga al amplificador en ese orden.
 - b) En la segunda sub-pestaña “Sensitivity” se deben poner los valores del dinamómetro, los cuales se encuentran en la hoja del Certificado de Calibración.
 - c) Para la tercer sub-pestaña “Unit” las unidades que se deben seleccionar, también se encuentran en la hoja de Certificado de Calibración.
 - d) Para la cuarta sub-pestaña “MeasuringRange” también se deben observar los parámetros que se encuentran en la hoja de Certificado de Calibración.
 - e) Para la quinta sub-pestaña “Unit” las unidades que se deben seleccionar también se encuentran en la hoja de Certificado de Calibración.

Cuando se terminan de poner todos los parámetros antes mencionados se da click en Aceptar.

2.4 Materiales

A continuación, se mencionan los materiales con los que se trabajaron los cuales son algunas de las aleaciones que se trabajan en las diferentes industrias metalmeccánicas.

2.4.1 Aluminio Al 1100

La serie 1000 consiste en aluminio con un mínimo de pureza del 99%. Las principales impurezas son por lo general, hierro y silicio, con la posible presencia de cobre o zinc en cantidades menores del 0.1% [26] el cual ofrece una excelente resistencia a la corrosión, gran conductividad tanto térmica como eléctrica y cuenta con capacidad de conformado, también es un material que se puede endurecer, sin embargo, tiene una resistencia relativamente baja. El Al 1100 es de las aleaciones más comerciales el cual que se utiliza en trabajos de chapa metálica en general, materiales de construcción, intercambiadores de calor, entre otros.

2.4.2 Aluminio Al 3103

La serie 3000 clasifica a las aleaciones de aluminio con manganeso con resistencia media [26] la cual puede ser aproximadamente un 20% más resistente que el

aluminio puro (serie 1000), es particularmente resistente a la corrosión por picadura y puede endurecerse para aumentar su resistencia. El Al 3103 cuenta con buena soldabilidad, se considera una buena aleación de uso general en el sector industrial por sus excelentes propiedades mecánicas el cual se utiliza en las industrias química, decorativa, alimentaria y bebida.

2.4.3 Aluminio Al 5005

La serie 5000 son aleaciones binarias de aluminio-magnesio [26], ofrece una resistencia entre media y alta, cuenta con buenas características de soldadura, buena resistencia a la corrosión, en particular en ambientes marinos. El Al 5005 tiene buena resistencia a la corrosión y se puede endurecer en un grado significativo trabajando en frío el cual se utiliza en procesamiento de productos químicos y alimenticios, tanques de almacenamiento, electrodomésticos, ventilación y aire acondicionado, además, en trabajos generales en chapa de metálica.

2.4.2 Propiedades

Las propiedades físicas y mecánicas de interés para las aleaciones fueron el módulo de Young ($E=70$ GPa), la relación de Poisson ($\nu=0.33$) y la densidad ($\rho=2700$ Kg/m³) [27]. Los valores de las propiedades mecánicas como el límite elástico y los parámetros relacionados con el comportamiento de endurecimiento se consideraron en las leyes de endurecimiento para cada material. Este trabajo se apoyó con las leyes de endurecimiento de Voce (Figura 2.14)

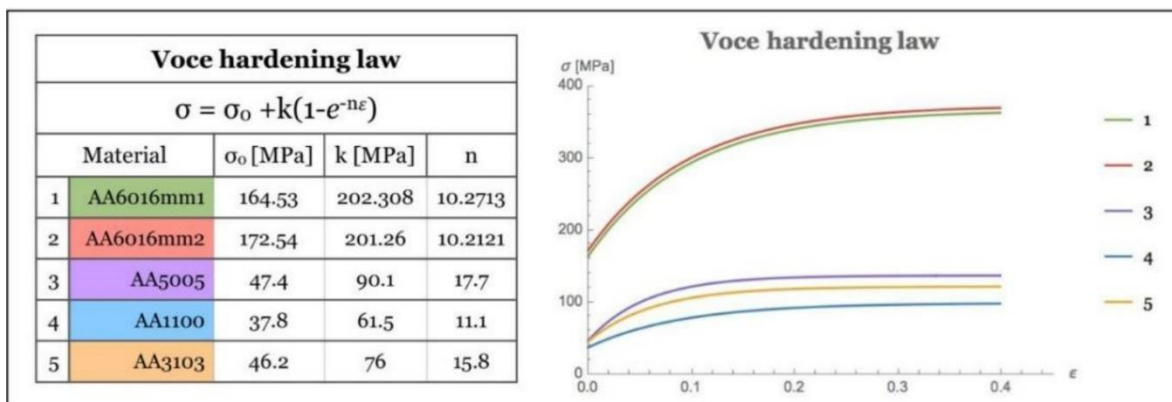


Figura 2.14 - Leyes de endurecimiento de Voce. [27]

Capítulo 3. Experimentación, escaneo y simulación

3.1 Simulación del Ensayo de Embutido

3.1.1 Ensayo de Swift

Para realizar el ensayo de embutido se tomó como base el ensayo de Swift que consta en embutir discos, en nuestro caso, de 85mm, haciendo uso de los troqueles de corte y de embutido, estos troqueles fueron diseñados y manufacturados respecto a las especificaciones de este ensayo el cual cuenta con un modelo ya existente en HMS. Esto tiene como objetivo repetir y simular el ensayo de Swift que antes se había estudiado en equipos de laboratorio. [3]

3.1.2 Validación de la simulación

Con la ayuda de la interfaz de HMS y el programa ABAQUS CAE, se realiza la simulación del proceso de embutido profundo para lámina de aluminio. La simulación no es tema de este trabajo de tesis por lo que solo ocuparon los resultados obtenidos de trabajos anteriores a este proyecto (Figura 3.1 y Figura 3.2) para continuar con el desarrollo de la subrutina HMS.

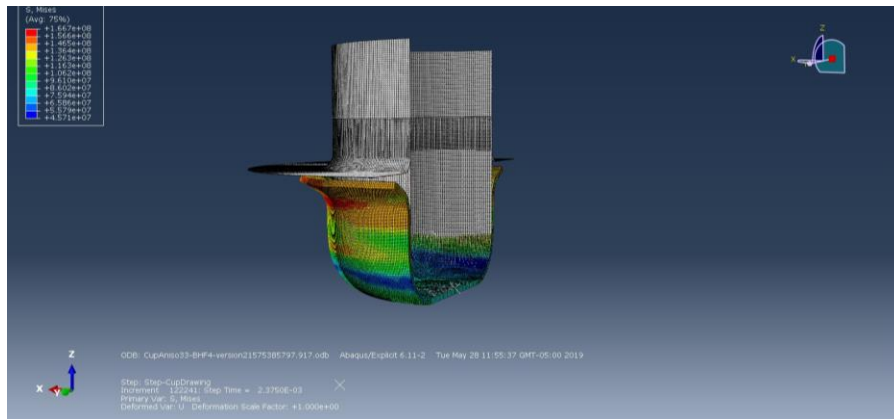


Figura 3.1 – Modelo para copa AI5005.

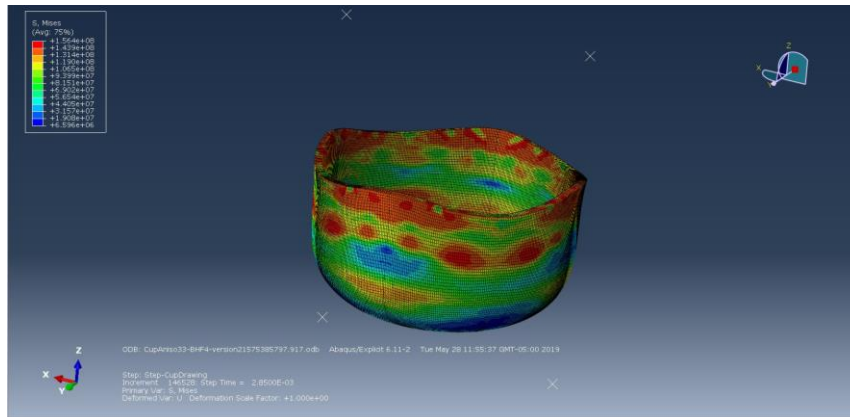


Figura 3.2.- Modelo final para copa AI5005.

Esta paquetería fue desarrollada por el Departamento de Metalurgia e Ingeniería de Materiales en KU Leuven, en el cual se programaron los modelos multi-escala ALAMEL y FC Taylor, así como la función potencial plástica FACET con el objetivo de predecir el comportamiento plástico anisotrópico. Utiliza una textura inicial del material representada por un ODF discreto con 5000 orientaciones. [10]

Con el modelo multi-escal (ALAMEL o FC Taylor) y los datos de la textura inicial se obtiene el lugar geométrico de la fluencia que describe el estado inicial del material de forma discreta. Posteriormente, los coeficientes desconocidos de la función FACET se obtienen con los datos del lugar geométrico de la fluencia previamente calculado, lo que permite obtener el espacio completo de forma analítica. HMS considera la ley de endurecimiento (Voce o Swift) para que la predicción tome en cuenta dicho efecto [28]. Finalmente, HMS permite actualizar la textura, lo que provoca una renovación del lugar geométrico de la fluencia progresivamente. La actualización se realiza sólo en los elementos finitos que sobrepasan un porcentaje de deformación plástica acumulada desde el ultimo incremento de tiempo en la simulación. El ciclo se repite hasta que la simulación termina.

3.2 Experimentación Ensayo de Embutido

3.2.1 Proceso de corte

Comenzando con el troquel de corte, para obtener los discos de 85mm, primero se procedió a recortar las láminas de aluminio (de la serie AA1100, AA3103 y AA5005) de 0.85mm de espesor en tiras de 100mm de ancho por el largo total de esta para garantizar que los discos de 85mm de diámetro se recortaran sin ningún problema.

Los recortes de las láminas se realizaron con una cizalla localizada en los laboratorios del Anexo de la Facultad de Ingeniería, ya obtenidas las tiras de corte, para alargar la vida de los instrumentales se hizo uso de lubricante, en nuestro caso

aceite DW-40, tanto en ambas partes del troquel (punzón y matriz) como en ambas caras de la tira a troquelar para después colocar las tiras entre el punzón y la matriz del troquel de corte y finalmente accionar la máquina troqueladora.

Debido a la insuficiencia del material proporcionado se realizaron 3 cortes por lámina, es decir, se obtuvieron tres discos de 85mm de diámetro por lamina (como se muestra en la Figura 3.3). Esta acción se repitió para la aleación AA1100, AA3103 y AA5005.

El proceso de corte no es objetivo principal de esta tesis por lo que no se requirió realizar mediciones de fuerza del proceso ni analizar el producto a detalle. A pesar de eso la pieza cortada no presentó bordes con rebaba ni defectos a la vista que pudieran afectar el proceso siguiente, lo que demostró el buenafilado del troquel y una buena alineación del mismo.



Figura 3.3 - Lámina de aluminio troquelada.

3.2.2 Proceso de embutido

Una vez realizado los cortes para cada lamina (AA1100, AA3103 y AA5005) en discos de 85 mm de diámetro, se procede a desmontar el troquel de corte para posteriormente montar el troquel de embutido. El troquel de embutido se alinea de la misma forma mencionada anteriormente. Una vez colocado y alineado el troquel de embutido se continuó con el proceso de embutido, en este caso, 9 ensayos, 3 ensayos por cada aleación como se describe a continuación.

Primero se configura el ensayo en el equipo de cómputo, dicho procedimiento se detalla mejor en el apartado 2.3. La operación de troquelado se realiza en cuestión de un segundo. Sin embargo, el ensayo se configura con una duración de 10s para que el operador tenga tiempo de iniciar el ensayo de medición de fuerza y posteriormente accionar la prensa para embutir el disco a ensayar.

Los discos son lubricados, por ambas caras, con aceite DW-40 al igual que el punzón, el pisador y la matriz del troquel, ya que estas son las piezas que se encuentran en constante fricción entre ellas durante el proceso de embutido, una vez lubricadas las piezas, el disco se coloca en la guía del pisador, asegurando que la dirección de laminado queda paralela con el portatroquel, como se logra observar en la Figura 3.4.



Figura 3.4 – Disco de AA5005 listo para embutir.

Ya colocado el disco en el troquel se continua con la puesta en marcha del ensayo de embutido, la maquina troqueladora cuenta con un interruptor de llave de tres posiciones, para la seguridad del operador todos los ensayos se realizaron en la posición de ambas manos, como se muestra en la Figura 3.5, así el operador tendría las manos ocupadas siempre que se accionaba la maquina y así evitar alguna manipulación en el troquel cuando la maquina fuera accionada.

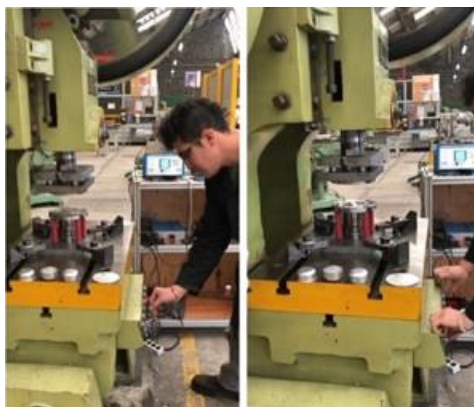


Figura 3.5 – Accionamiento de la máquina troqueladora.

Por último, el operador recupera la gráfica de la medición de fuerzas y se recupera la pieza troquelada (Figura 3.6) para realizar el siguiente ensayo repitiendo los pasos mencionados anteriormente.

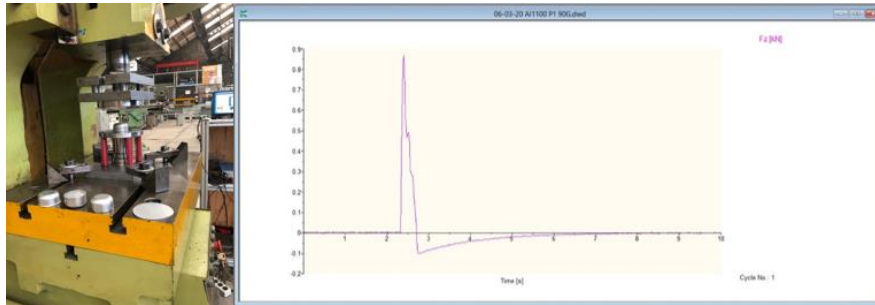


Figura 3.6 – Copa embutida y fuerza de embutido para Al5005.

Al termino de los ensayos las piezas son limpiadas para eliminar cualquier tipo de residuo de lubricante para ser enviadas al área de mediciones mecanicas, especificamente al escaner de coordenadas 3D para que sean digitalizadas por medio de un escaner de proyeccion laser generando una nube de puntos y poder comparar la geometria obtenida en el experimento con la geometría del modelo de elemento finito.

3.3 Procedimiento de digitalización de las copas

3.3.1. Descripción general.

Una vez producidas las copas del ensayo de embutido, el siguiente paso es llevar las piezas troqueladas al escáner de coordenadas 3D empotrado en una mesa de granito. El escáner consta de un brazo formado por dos extensiones, tres articulaciones y una pistola con palpador de contacto o un escáner de láser, dicho brazo se encuentra empotrado en una mesa de granito.

Para realizar la digitalización de las piezas se ocupó una base con un tornillo, de 300mm de alto y 6mm de diámetro aproximadamente, como se muestra en la Figura 3.7 y un poco de pegamento industrial para mantener suspendido la pieza sobre el tornillo y poder escanear la pieza de arriba hacia abajo y por todos sus ángulos.



Figura 3.7 – Base con tornillo.

Como se tomó la decisión de utilizar el escáner láser, se recurrió a pintar el fondo de las copas de un color obscuro (Figura 3.8), en este caso, negro mate para que, al momento de realizar el barrido en el fondo de la copa, el láser no refleje en las paredes internas de la copa y realice mediciones falsas en el proceso.



Figura 3.8 – Copas de Al 3103 con fondo pintado, negro mate.

3.3.2 Obtención de la geometría de las piezas embutidas

Inicialmente para operar el escáner de coordenadas 3D con el barrido láser, es recomendable encender el equipo 30min antes de su utilización para que el equipo se caliente y poder realizar la calibración de forma correcta, ya que si no se sigue esta recomendación es casi imposible calibrar el escáner láser, lo que puede generar mediciones erróneas. La calibración del palpador láser se realiza con una placa patrón en la pestaña de compensación.

Ya calibrado el equipo de medición se prosigue con la digitalización de la pieza, para realizar una correcta toma de la muestra el palpador láser cuenta con dos haces de luz, un haz horizontal de color azul y un haz en forma de cruz de color rojo, dichos haces de luz deben coincidir entre ellos al momento de que el palpador láser se acerca al objeto de muestra. Cuando dichos haces de luces coinciden, el

palpador laser cuenta con un indicador led alrededor de su punta, el cual se muestra en diferentes colores como se muestra en la Figura 3.9.

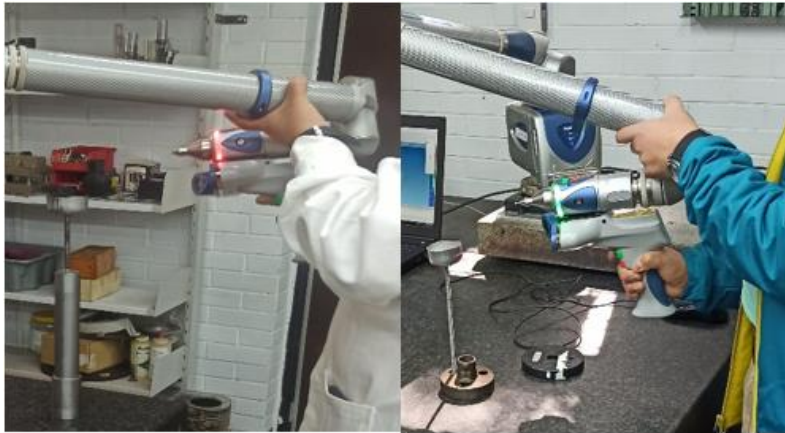





Figura 3.9 – Led indicador del palpador láser.

Dicho palpador presenta tres diferentes colores, rojo, amarillo y verde, como se describen en la Tabla 3.1. Los indicadores cambian cuando los haces de luz no coinciden (se encuentran muy alejados) o cuando estos coinciden (están uno encima del otro).

Tabla 3.1 - Indicadores del palpador láser.

Color	Descripción
	El palpador láser se encuentra distante de la pieza a medir por lo que los haces de luz no coinciden. Se debe acercar el palpador a la pieza
	El palpador se encuentra en una distancia donde ya puede reconocer la pieza a medir. Sin embargo, las muestra a tomar no pueden ser del todo confiable.
	El palpador se encuentra en la distancia adecuada para tomar muestras fiables de la pieza a medir ya que los haces de luz se encuentran coincidentes.

Una vez teniendo en cuenta estas consideraciones se comienza a realizar el barrido del láser en toda la pieza a medir de forma manual. Para comenzar la generación de la nube de puntos se presiona el botón verde, que se encuentre en el mango de la pistola del palpador láser o en la parte superior del mismo, dejándolo sostenido durante el barrido de la pieza y soltándolo cuando se quiera dejar de tomar datos de la pieza. Al finalizar el barrido de toda la pieza se presiona el botón rojo, localizado debajo del botón verde antes mencionado para finalizar la adquisición de datos.

Cabe mencionar que esta operación requiere de capacitación y habilidad del operador, ya que debe mantener un pulso constante para que la digitalización de la pieza sea lo más precisa posible.

El equipo Faro Arm, inicialmente sólo genera una nube de puntos de medición. Ésta tiene que ser procesada para poder comparar, de manera cuantitativa la geometría medida con la obtenida en las simulaciones. Si bien, el equipo cuenta con su propia paquetería, ésta no provee datos que posteriormente se pueden comparar con los resultados de elemento finito. Por lo tanto, en el marco de esta tesis, el equipo de trabajo desarrolló la paquetería correspondiente en Mathematica.

Al término de la toma de nubes de puntos se procede a realizar, en el software, una limpia de los elementos que no forman parte de la copa medida, para que finalmente se pueda exportar el archivo a un dispositivo USB en formato STL y/o TXT para poder ser leído y analizado en la paquetería Mathematica.

Es importante mencionar que si se desea exportar la nube de puntos en formato TXT para realizar la exportación de datos más rápido y el equipo de cómputo pueda procesar los datos sin problema es recomendable dividir el objeto en secciones de 1mm hasta cubrir toda la pieza y al final juntar los datos en un archivo para que posteriormente sea exportado en Mathematica.

En la Figura. 3.10. se muestra la nube de puntos en la parte izquierda y en la parte derecha se muestra la geometría sólida generada por la paquetería Meshmixer para observar que la digitalización de la copa sea lo más parecido al original. Se nota que la geometría requiere de un proceso de suavizado, ya que se observen defectos en la superficie, mismos que no ocurren en la pieza física producida.

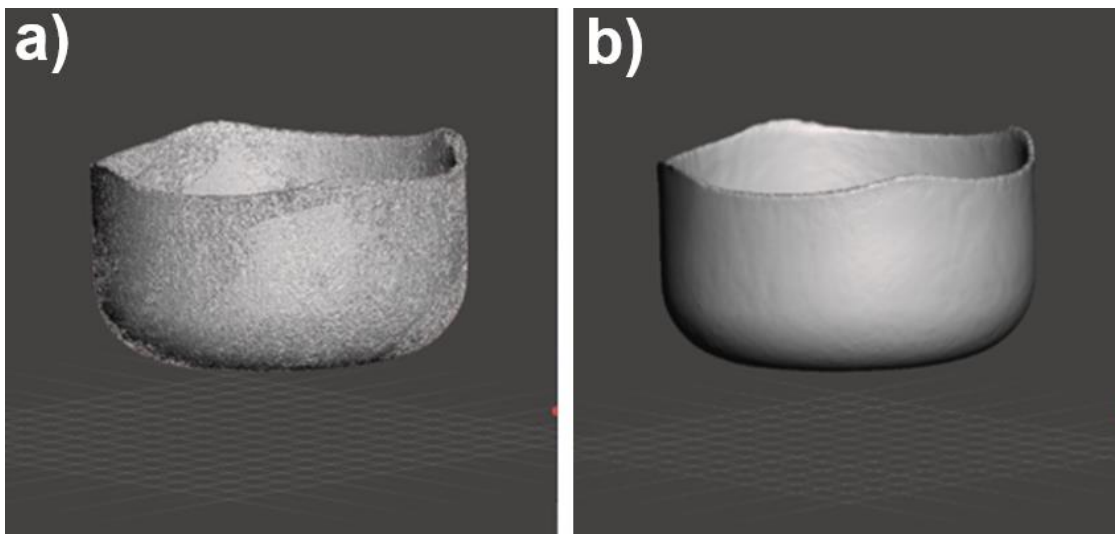


Figura 3.10 - Copa de Al5005 completamente cerrada con paquetería Meshmixer. (a) pieza obtenida de la adquisición de datos, b) pieza procesada y suavizada por la paquetería)

Ya escaneada la pieza, se procede a la exportación de los archivos en formato .txt para que estos puedan ser reconocidos con el software Mathematica. Dicho procedimiento se describe a continuación.

Para explicar los pasos tomados en la determinación de la geometría, se describe el procedimiento completo para la Copa AA5005.

1) Primero se genera una gráfica de los puntos medidos. En este caso, se trata de 363299 puntos, sólo se presenta cada decimo punto (Figura 3.11).

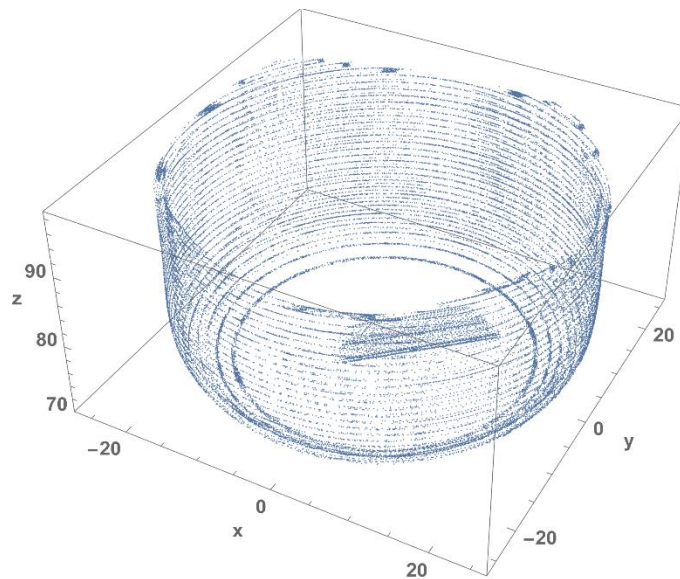


Figura 3.11 - Ejemplo de la nube de puntos graficada por Mathematica. (Sólo se presenta cada decimo punto).

2) Se define el eje vertical de la copa, se centra la pieza y se eliminan los puntos de la base de la copa, sin modificar el punto 0 de las mediciones (base de la copa), estos puntos no son representativos porque el fondo de la copa no presenta ningún cambio y al tenerlos presente, los tiempos de cómputo se incrementa de forma exponencial. Los puntos cuya altura es menor que un valor h_0 se excluyen del análisis. Típicamente $h_0=2.2\text{mm}$. El método de análisis descrito en este texto tiene que modificarse para poder analizar los puntos en la base. Se transforma la lista de mediciones en coordenadas polares.

3) Se analizan los puntos medidos por sectores con ancho $\Delta\theta$, en los análisis presentados, $\Delta\theta=1^\circ$. Se genera un ajuste de mínimos cuadrados por todos los puntos del sector mediante un polinomio:

$$r(\theta_m, z) = \sum_{n=0}^N a_{mn} z^n \quad (20)$$

Aquí, θ_i es el ángulo que define el centro del sector, r el radio, z la altura y los a_{ni} los coeficientes de ajuste. Las copas se analizaron poniendo $N=6$, un valor muy alto del número de términos genera variaciones aleatorias en las gráficas de los puntos, ya que se pierde precisión en la determinación de los a_{mn} .

Este primer polinomio ajustado define la línea central de la copa para el ángulo θ_m . Los puntos cuyo radio es mayor a $r(\theta_m, z)$ pertenecen a la pared exterior, los otros a la pared interior. Se repite el ajuste para estos puntos por separado, obteniendo los coeficientes a_{mn}^{ext} y a_{mn}^{int} .

4) Los los coeficientes a_{mn}^{ext} y a_{mn}^{int} están definidos para M valores discretos de θ ($M=360$ para intervalos de 1°). Mediante el método de mínimos cuadrados, se ajusta una serie de Fourier a estos valores:

$$a_n^p(\theta) = \sum_{l=0}^L c_{ln} \cos(l\theta) + \sum_{l=1}^L d_{ln} \sin(l\theta) \quad (21)$$

El superíndice p refiere a “int” o “ext”. El valor de L no se puede exagerar, ya que esto induce términos que ya no se pueden determinar con la debida precisión, produciendo variaciones “caprichosas” en la gráfica. Se utilizó un valor de 6, resultando en una serie de Fourier de 13 términos. El término de los cosenos con $l=0$ es igual a 1, c_{l0} corresponde al radio promedio de la superficie interior/exterior de la copa.

5) La altura de la copa también se modela con una serie de Fourier. Para este fin, se toma el punto más alto de la superficie interior y exterior en un sector dado y se promedian los dos valores, generando una lista de M alturas h_m . Se ajusta una serie de Fourier a estos datos:

$$h(\theta) = \sum_{l=0}^L c_l \cos(l\theta) + \sum_{l=1}^L d_l \sin(l\theta) \quad (22)$$

6) La gráfica de la copa es una gráfica paramétrica definida por el vector $(r^p(\theta, z) \cos \theta, r^p(\theta, z) \sin \theta, z)$ donde:

$$r^p(\theta, z) = \sum_{n=0}^N a_n^p(\theta) r^n \quad (23)$$

y:

$$h_0 < z < h(\theta) \quad (24)$$

Al no respetar esta última regla, el ajuste polinómico produce extrapolaciones muy grandes.

7) Análisis de la copa modelado en HMS: El procedimiento es similar a la copa medida, con las siguientes diferencias:

1. Se sabe de antemano cuales son los puntos interiores, exteriores y del borde de la copa. Esto reduce el tiempo de cálculo de manera drástica (40 min para las mediciones, 4 min. para el archivo FEM, Figura 3.12).

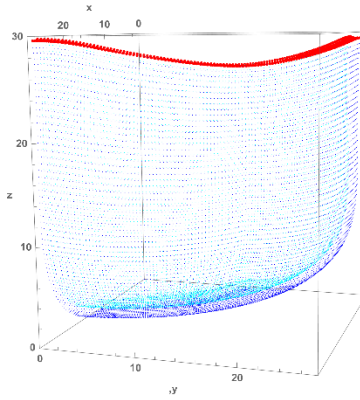


Figura 3.12 - Ejemplo de los nodos en la copa AA5005, graficada por Mathematica.

2. Sólo se cuenta con la simulación de 1/4 de la copa. Por la simetría del problema, se sabe que las series de Fourier se reducen a:

$$a_n^p(\theta) = \sum_{l=0}^L c_{ln} \cos(2l\theta) \quad (25)$$

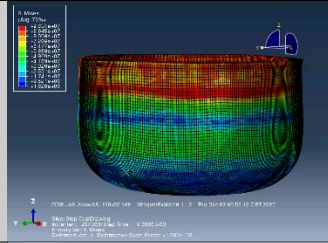

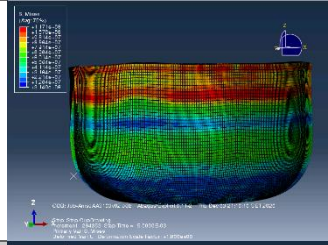

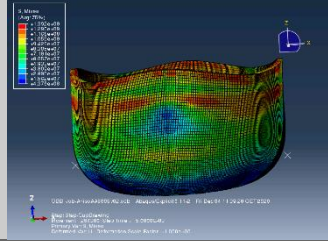
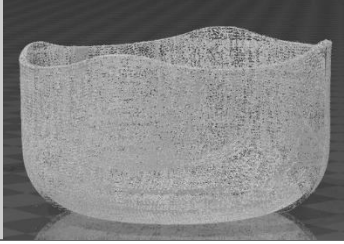
$$h(\theta) = \sum_{l=0}^L c_l \cos(2l\theta) \quad (26)$$

Mediante estas fórmulas, el ajuste de las funciones a 1/4 de la copa permite graficar la copa entera.

3. Se nota que ABAQUS tiene todas las facilidades para graficar la copa modelada. Sin embargo, no hay manera de utilizar la paquetería para comparar el resultado con la copa medida. Por lo tanto, también los resultados de elemento finito se analizaron mediante Mathematica (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 - Incompatibilidad entre las gráficas de ABAQUS y medición de coordenadas.

(Al no tener coincidencia entre los nodos de ambos resultados, no se puede hacer la comparación cuantitativa).

Aleación	Simulación	Pieza escaneada
AA1100		
AA3103		
AA5005		

8) Comparación entre copa medida y modelada.

Durante la medición, la alineación entre la dirección de laminado del disco y el sistema de referencia de la máquina de coordenadas no siempre es perfecto. Por lo tanto, el perfil medido en el disco no necesariamente muestra la simetría ortotrópica de la lámina. Sin embargo, esta ortotropía es un elemento fundamental del problema, por lo que se vale simetrizar la copa medida de la siguiente manera [25]:

$$r_{sim}^p(\theta, z) = \frac{r^p(\theta+\delta\theta, z) + r^p(-\theta-\delta\theta, z) + r^p(\pi+\theta+\delta\theta, z) + r^p(\pi-\theta-\delta\theta, z)}{4} \quad (27)$$

$$h_{sim}(\theta, \delta\theta, \delta h) = \frac{h(\theta+\delta\theta) + h(-\theta-\delta\theta) + h(\pi+\theta+\delta\theta) + h(\pi-\theta-\delta\theta)}{4} + \delta h \quad (28)$$

Los cuatro términos en el numerador corresponden a los valores que, por simetría, deben ser idénticos para la copa perfectamente centrada. El valor de $\delta\theta$ es la corrección del ángulo que toma en cuenta un posible desalineamiento de la copa y la máquina de coordenadas, el valor δh considera la diferencia de la altura promedio entre la copa medida y la modelada. Los valores de $\delta\theta$ y δh se determinan de manera numérica, minimizando la siguiente integral:

$$TSD = \int_{-\pi}^{\pi} (h_{sim}(\theta, \delta\theta, \delta h) - h_{FEM}(\theta))^2 d\theta \quad (29)$$

El símbolo TSD refiere a la diferencia cuadrada total (Total square difference), la diferencia media cuadrada se encuentra dividiendo este valor por el intervalo de integración (2π). La precisión en la predicción de la altura de las orejas se caracteriza por la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{TSD_{Min}}{2\pi}} \quad (30)$$

El error en la predicción de la altura de la copa (Figura 3.13y Figura 3.14) se caracteriza por el valor de δh . La desviación estándar típicamente se asocia con la precisión de los métodos utilizados para la predicción de la anisotropía de la lámina; δh se asocia con la incertidumbre relativa a la fuerza del pisador y el coeficiente de fricción entre lámina y herramienta [2]. Se recuerda que la fuerza del pisador en el modelo corresponde a un equipo de laboratorio marca Zwick, que ejerce una fuerza constante, mientras el troquel utilizado ejerce una fuerza que incrementa de manera proporcional a la carrera de la troqueladora.

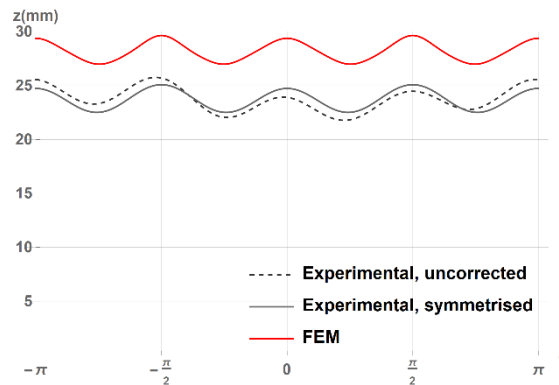


Figura 3.13 - AA 5005. Perfiles de oreja sin corrección, simetrizadas (Fórmula 28) y obtenida en el modelo.

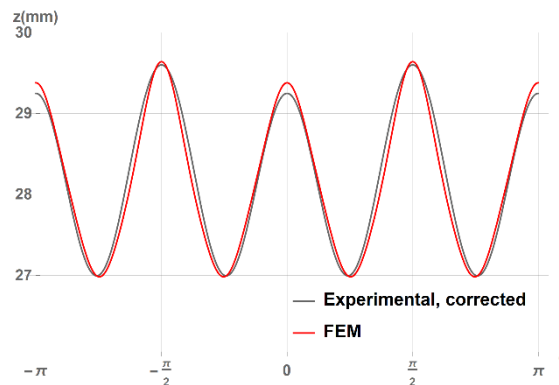


Figura 3.14 - AA5005 Perfiles de oreja para los valores de $\delta\theta$ y δh óptimas.

Capítulo 4. Resultados y discusiones

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de embutido, tanto experimentales como teórico. Dichos resultados se clasifican por aleación, Al1100, Al3103 y Al5005, donde se muestran los resultados de las fuerzas medidas del experimento, resultados de la simulación y la obtención de la pieza digitalizada por el escáner de coordenadas 3D. Cabe aclarar que el estudio de fuerzas del ensayo de embutido no es un objeto prioritario de estudio de esta tesis, sin embargo, los troqueles están habilitados para obtener estos resultados y poder ser de ayuda para futuros proyectos de estudio.

4.1 Aluminio 1100

4.1.1 Fuerzas obtenidas en los experimentos Al 1100

En la Figura 4.1 se observan las fuerzas totales del proceso de embutido para los discos de Al 1100, de la cuales se realizaron tres ensayos (P1, P2 y P3). Dicha fuerza se encuentra en promedio 18,000N ~ 1.8T fuerza.

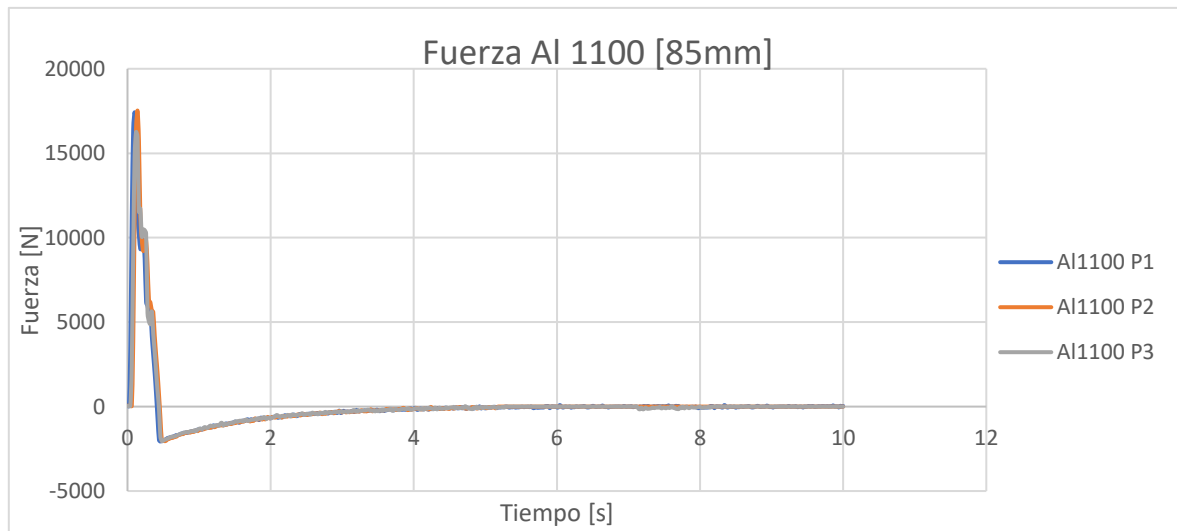


Figura 4.1 – Grafica de fuerzas para Al 1100.

4.1.2 Resultados de la simulación Al 1100

Se presenta en Figura 4.2 la copa de Al 1100 generada por el método de HMS y ABAQUS, del lado izquierdo y del lado derecho la copa obtenida del ensayo, este mismo proceso se realizó para el resto de las aleaciones (Al 3103 y Al 5005) mostrando la copa generada por la simulación, la copa obtenida por el ensayo de embutido, además, como la digitalización de dicha copa para que finalmente se

muestren los resultados de la comparación entre en ensayo y la simulación del proceso de embutido.

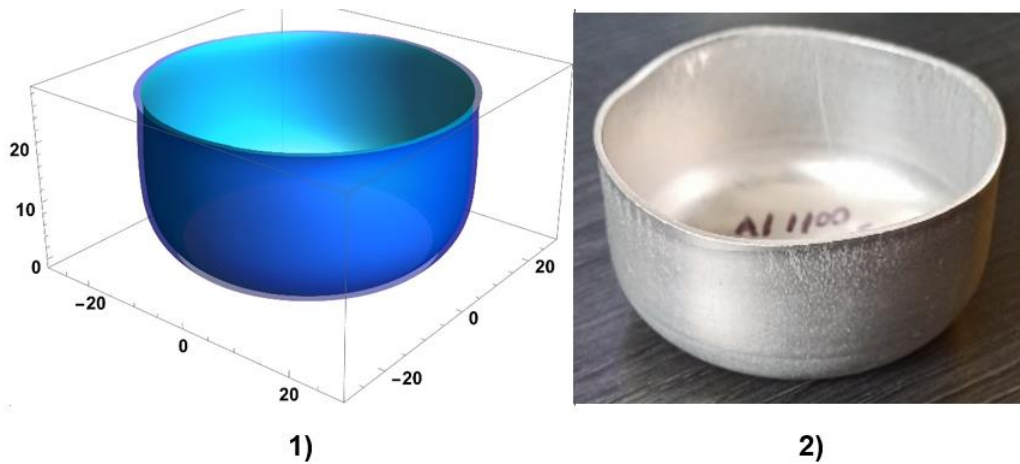


Figura 4.2 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 1100.

4.1.3 Copa escaneada con escáner de coordenadas 3D Al1100

En la Figura 4.3 se muestra la nube de puntos de la copa experimental obtenida por el ensayo de embutido de la aleación de Al 1100 generada por el escáner de coordenadas 3D (lado izquierdo), mostrando una similitud a la copa simulada y a continuación, del lado derecho, la copa final de Al 1100 procesada por la paquetería de Mathematica lista para comparar los resultados de la simulación con el experimento. Dicha comparación se muestra en el siguiente apartado.

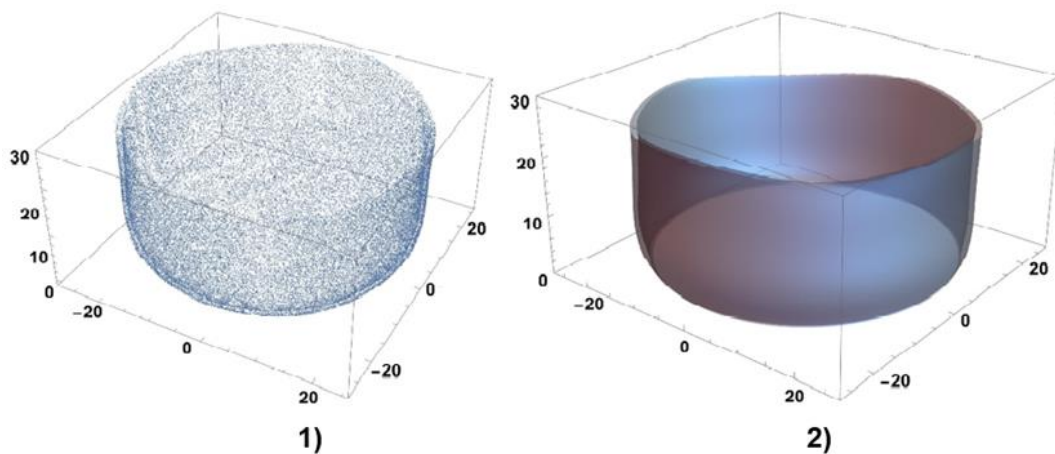


Figura 4.3 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al 1100.

4.1.4 Análisis de resultados para la lámina Al1100

Los análisis de resultados para la lámina de Al1100 comienzan con la Figura 4.4, comparando la altura de las copas obtenidas de la simulación, línea de color rojo, dando una altura aproximada de 28mm contra la altura promedio obtenida de los experimentos del ensayo, línea de color azul, dando una altura aproximada de 25mm. Donde se observa que la diferencia entre estas alturas da como aproximado un error de porcentaje del 10.71%.

Este proceso se replicará para las próximas aleaciones Al3103 y Al5005.

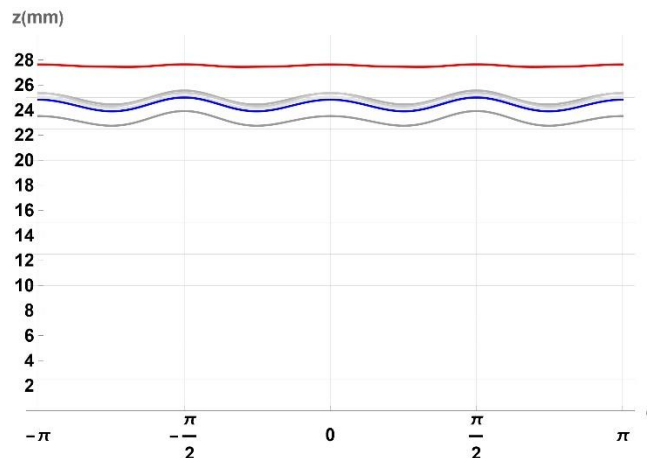


Figura 4.4 – Grafica de Altura de la copa para Al 1100.
(Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

En la Figura 4.5 se muestra los resultados de las orejas de la lámina Al1100 que se generan en el proceso de embutido por la anisotropía del material, mostrando en la gráfica la posición y la amplitud de estas mismas. Se puede observar de línea roja el resultado obtenido de la simulación del ensayo de embutido y de línea azul el resultado promedio obtenido de los ensayos de embutido en Al 1100.

Se observa que la posición de las protuberancias formadas en el borde de la copa, también conocidas en la industria como orejas, coinciden tanto en el experimento como en la simulación, sin embargo, entre las alturas de las orejas se presenta una diferencia, donde para la simulación, las orejas tienen aproximadamente 0.20mm y para el experimento las orejas tienen aproximadamente 1.20mm de altura.

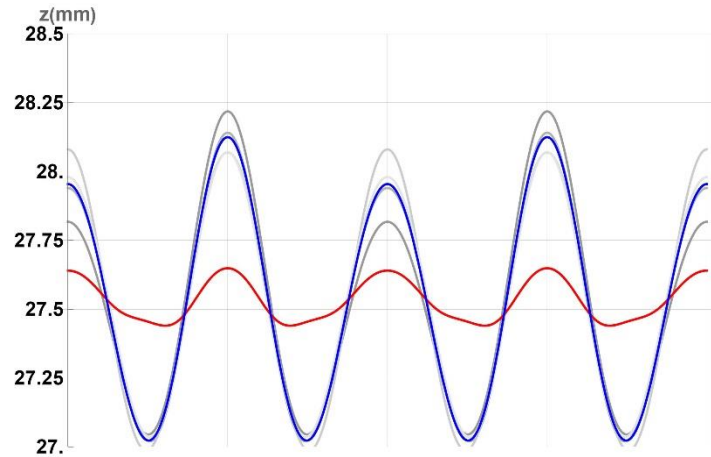


Figura 4.5 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 1100.
(Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

Por último, en la Figura 4.6 se muestra el comportamiento del espesor de la lámina de Al1100 una vez formada la copa, mostrándose de color rojo el resultado de la simulación del ensayo y de color negro el resultado del experimento. En ambos casos se observa que el espesor de la lámina se comporta de manera uniforme en la pared de la copa formada, sin embargo, en el resultado de la simulación se observa que el espesor se reduce en el fondo de la copa, en cambio, en el resultado del experimento, se sigue asemejando a un comportamiento constante

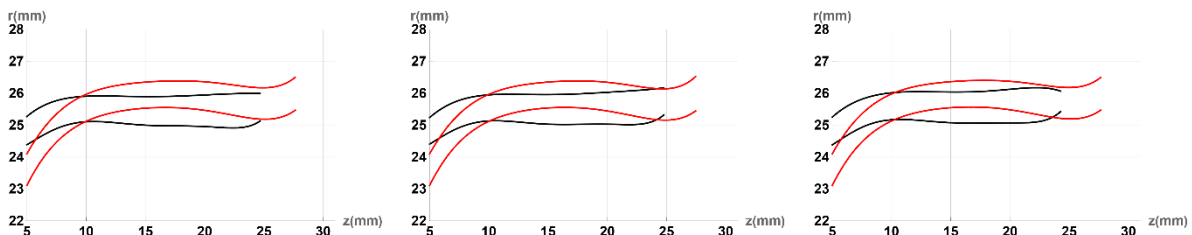


Figura 4.6 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 1100. Rojo simulación, negro experimento.

4.2 Aluminio 3103

4.1.1 Fuerzas obtenidas en los experimentos Al3103

En la Figura 4.7 se observa las fuerzas totales del proceso de embutido para los discos de Al 3103 variando la posición de la dirección de laminado de 0° a 45° y a 90° aproximadamente. Dicha fuerza se encuentra en promedio 15,000N ~ 1.5T fuerza.

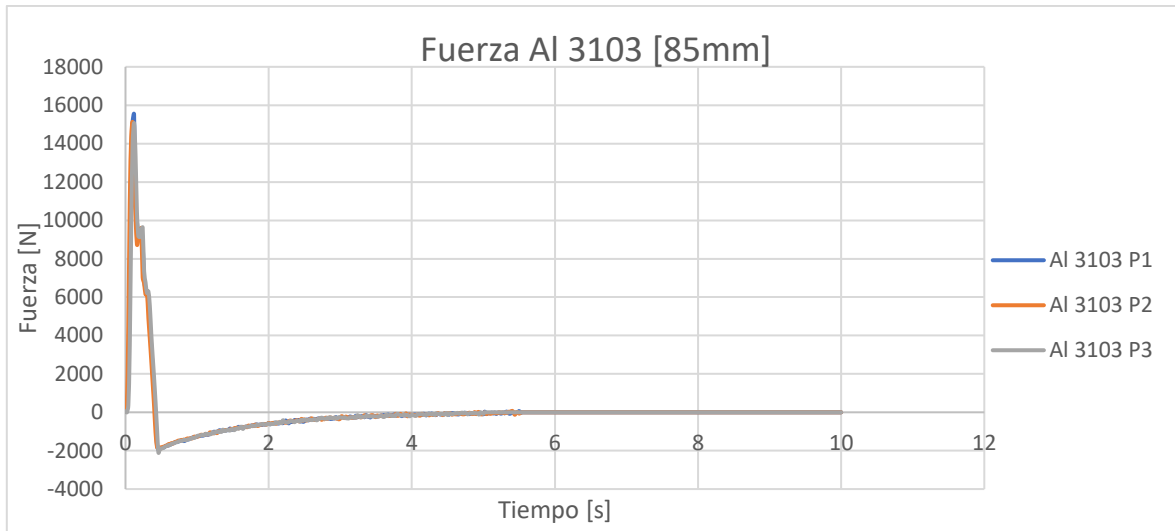


Figura 4.7 – Grafica de fuerzas para Al 3103.

4.2.2 resultados de la simulación Al 3103.

De la misma forma se muestra en la Figura 4.8, la copa de Al 3103 generada por la interfaz de HMS y ABAQUS (del lado izquierdo) y la copa obtenida del ensayo de embutido (lado derecho).

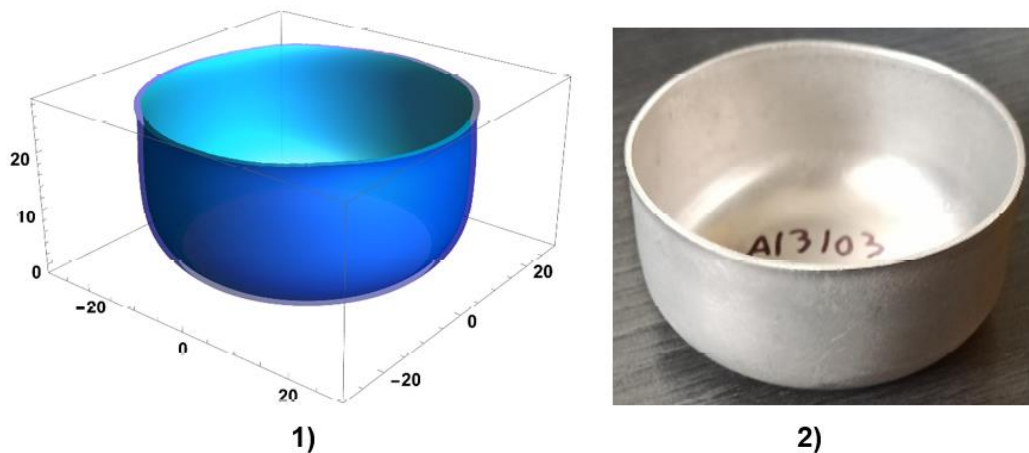


Figura 4.8 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 3103.

4.2.3 Copa escaneada con escáner de coordenadas 3D Al 3103.

En la Figura 4.9 se muestra la nube de puntos de la copa experimental obtenida por el ensayo de embutido de la aleación de Al 3103 generada por el escáner de coordenadas 3D (lado izquierdo), mostrando una similitud a la copa simulada y a continuación, del lado derecho, la copa final de Al 3103 procesada por la paquetería

de Mathematica lista para comparar los resultados de la simulación con el experimento. Dicha comparación se muestra en el siguiente apartado.

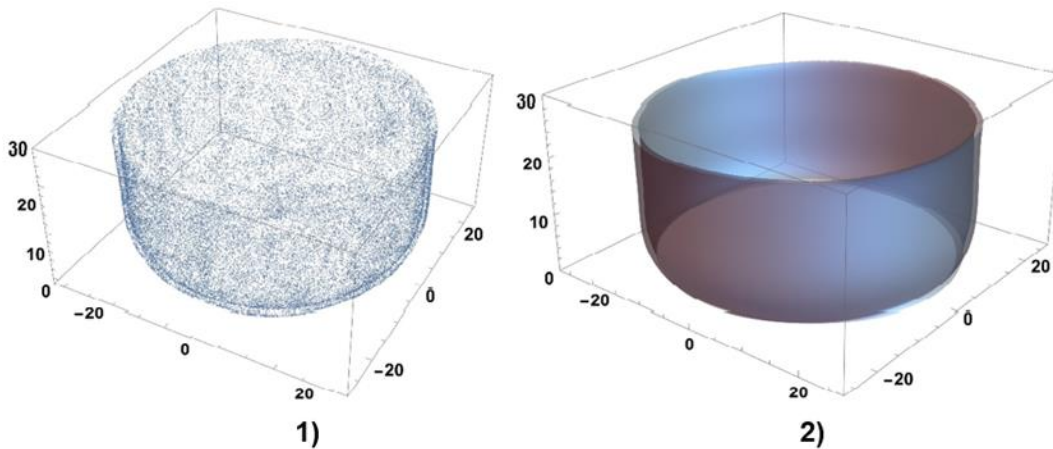


Figura 4.9 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al3103.

4.2.4 Análisis de resultados Al 3103.

Los análisis de resultados para la lámina de Al 3103 comienzan con la Figura 4.10, comparando la altura de las copas obtenidas de la simulación, línea de color rojo, dando una altura aproximada de 27.5mm contra la altura promedio obtenida de los experimentos del ensayo, línea de color azul, dando una altura aproximada de 25mm. Se puede observar que la diferencia entre estas alturas se encuentra a un valor aproximado de error de porcentaje del 9.09%.

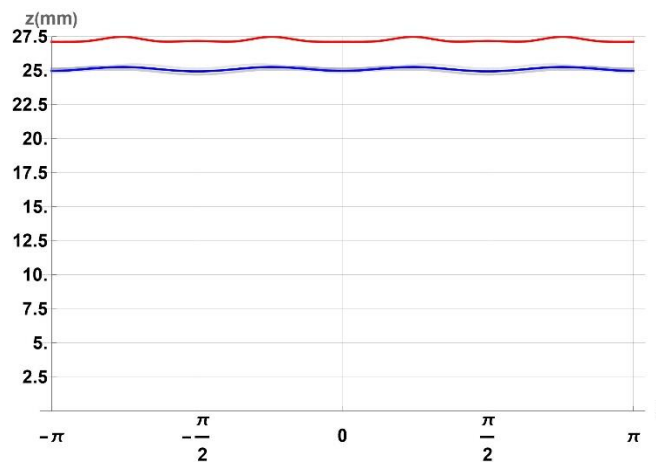


Figura 4.10 – Grafica de Altura de la copa para Al 3103.
(Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

En la Figura 4.11 se muestra los resultados de las orejas de la lámina Al 3103 que se generan en el proceso de embutido por la anisotropía del material, mostrando en

la gráfica la posición y la amplitud de estas mismas. Se puede observar de línea roja el resultado obtenido de la simulación del ensayo de embutido y de línea azul el resultado promedio obtenido de los ensayos de embutido en Al 3103.

Se observa que la posición de las orejas, al igual que la anterior aleación, coinciden tanto en el experimento como en la simulación, sin embargo, entre las alturas de las orejas se presenta una diferencia dando como resultado para la simulación una altura en las orejas de aproximadamente 0.37mm y para el ensayo, las orejas se presentan con una altura aproximada de 0.25mm, dando como error de porcentaje del 32.43%

Para este caso se nota un comportamiento inusual en los valles de la gráfica de la simulación, dicho comportamiento no se presenta en ninguno de los ensayos obtenidos.

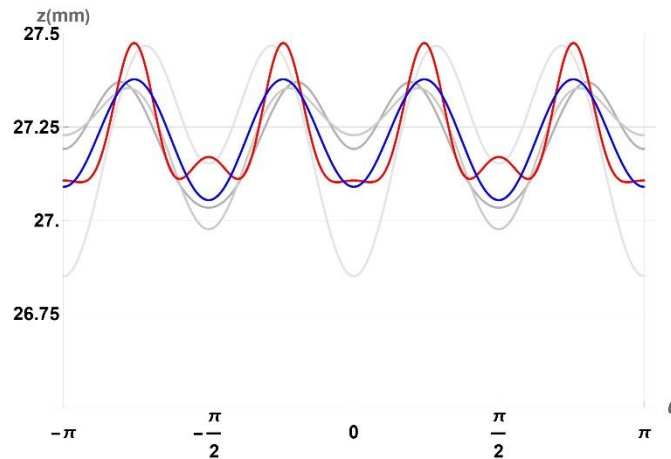


Figura 4.11 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 3103.
(Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

Por último, en la Figura 4.12 se muestra el comportamiento del espesor de la lámina de Al 3103 una vez formada la copa, mostrándose de color rojo el resultado de la simulación del ensayo y de color negro el resultado del experimento. En ambos casos se observa que el espesor de la lámina se comporta de manera uniforme en la pared de la copa formada, sin embargo, en el resultado de la simulación se observa que el espesor se reduce en el fondo de la copa, en cambio, en el resultado del experimento continua constante.

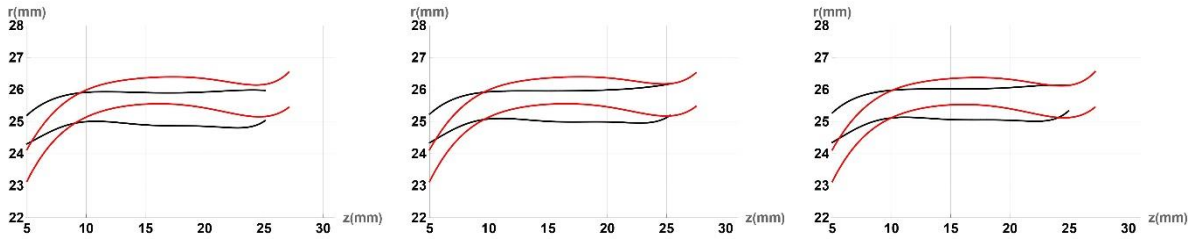


Figura 4.12 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 3103. Rojo simulación, negro experimento.

4.3 Aluminio 5005

4.3.1 Fuerzas obtenidas en los experimentos Al5005.

En la Figura 4.13 se observa las fuerzas totales del proceso de embutido para los discos de Al 5005. Dicha fuerza se encuentra en promedio 16,000N ~ 1.6T fuerza.

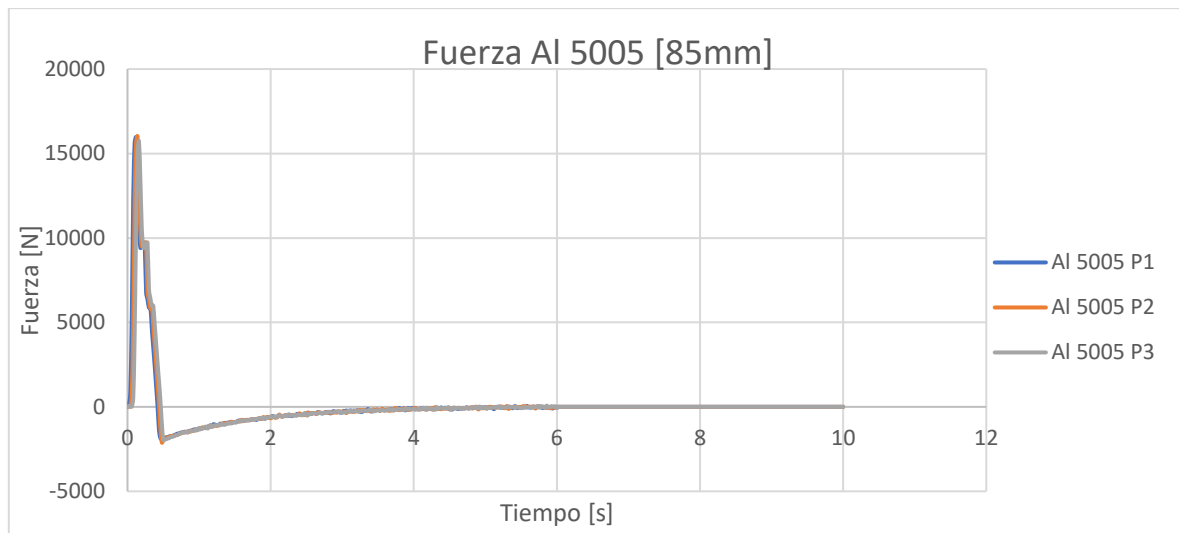


Figura 4.13 – Grafica de fuerzas para Al 5005.

4.3.2 Resultados de la simulación.

De la misma forma se muestra en la Figura 4.14, la copa de Al 5005 generada por la interfaz de HMS y ABAQUS.

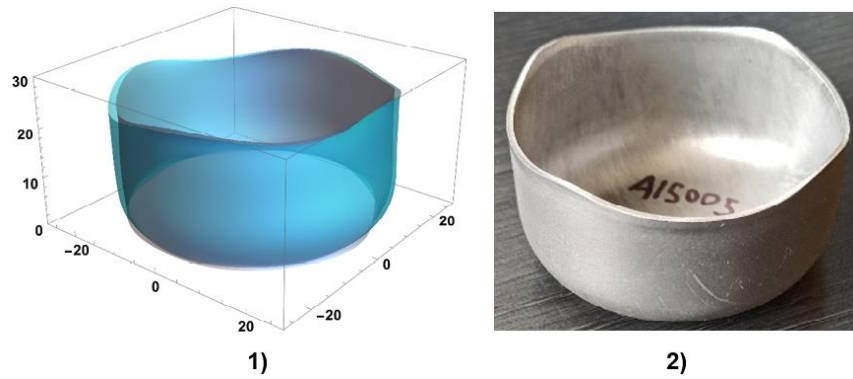


Figura 4.14 – 1) Copa final de la simulación 2) Copa final del ensayo de Al 5005.

4.3.3 Copa escaneada con escáner de coordenadas 3D.

Como se ha estado trabajando, en la Figura 4.15 se muestra la nube de puntos de la copa experimental obtenida por el ensayo de embutido de la aleación de Al 5005 generada por el escáner de coordenadas 3D (lado izquierdo), mostrando una similitud a la copa simulada, y a su vez, del lado derecho, la copa final de Al 5005 procesada por la paquetería de Mathematica lista para comparar los resultados de la simulación con el experimento. Dicha comparación se muestra en el siguiente apartado.

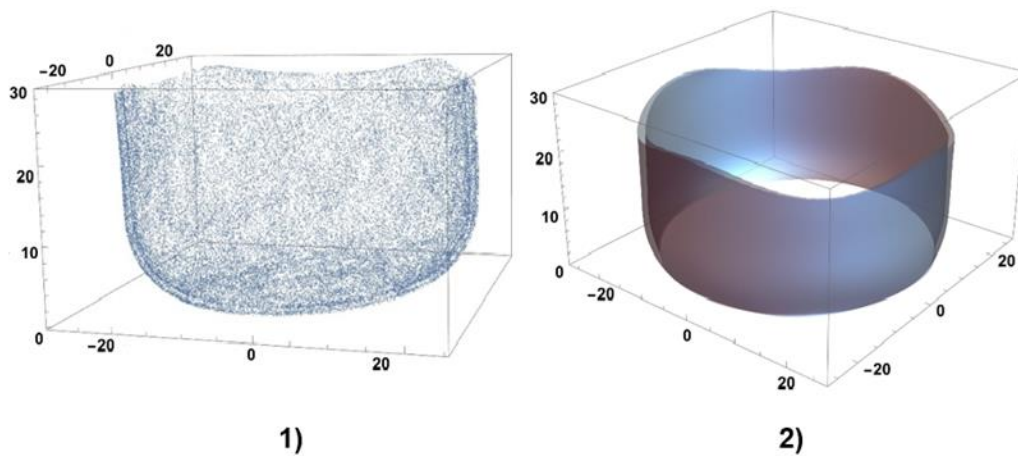


Figura 4.15 – 1) Nube de puntos copa experimental 2) Copa cerrada experimental de Al5005.

4.3.4 Análisis de resultados Al5005.

Los análisis de resultados para la lámina de Al 5005 comienzan con la Figura 4.16, comparando la altura de las copas obtenidas de la simulación, línea de color rojo, dando una altura aproximada de 28.5mm contra la altura promedio obtenida de los experimentos del ensayo, línea de color azul, dando una altura aproximada de

26mm. Se observa que la diferencia que se presenta entre estas alturas da aproximadamente un error de porcentaje del 8.77%.

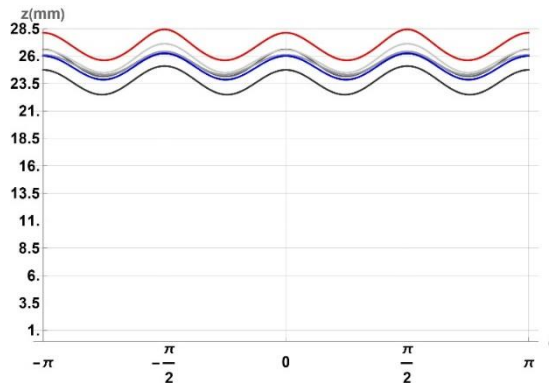


Figura 4.16 – Grafica de Altura de la copa para Al 5005.
 (Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

En la Figura 4.17 se muestra los resultados de las orejas de la lámina Al 5005 que se generan en el proceso de embutido por la anisotropía del material, mostrando en la gráfica la posición y la amplitud de estas mismas. Se puede observar de línea roja el resultado obtenido de la simulación del ensayo de embutido y de línea azul el resultado promedio obtenido de la experimentación del ensayo de embutido.

Se observa que la posición de las orejas, al igual que la anterior aleación, coinciden tanto en el experimento como en la simulación, sin embargo, a diferencia de las otras dos aleaciones, en este caso el comportamiento de la altura de las orejas es muy parecida, donde para la simulación las orejas tienen aproximadamente 2.5mm y para el experimento las orejas tienen cuentan con una altura aproximada de 2.25mm.

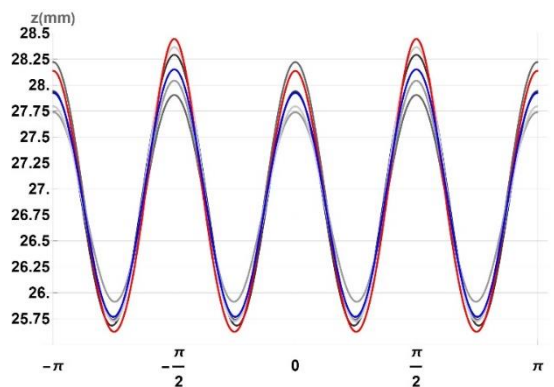


Figura 4.17 – Grafica de posición de orejas de la copa para Al 5005.
 (Las líneas grises indican las tres copas individuales, la azul es el promedio de los tres experimentos, la roja es la predicción mediante HMS).

Por último, en la Figura 4.18 se muestra el comportamiento del espesor de la lámina de Al 5005 una vez formada la copa, mostrándose de color rojo el resultado de la simulación del ensayo y de color negro el resultado del experimento. Como en los anteriores casos se observa que el espesor de la lámina se comporta de manera uniforme en la pared de la copa formada, sin embargo, en el resultado de la simulación se observa que el espesor se reduce en el fondo de la copa, en cambio, en el resultado del experimento no ocurre esto.

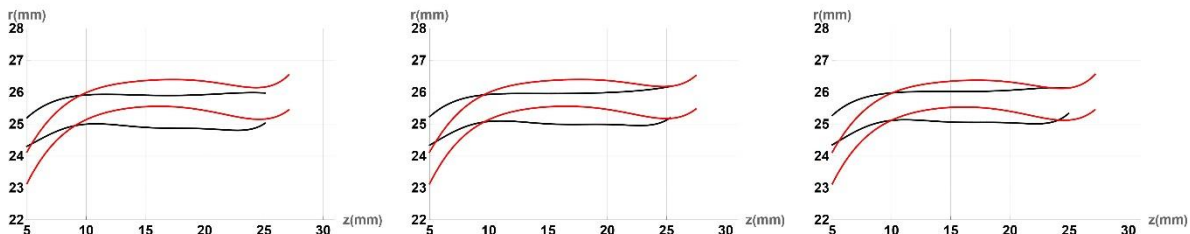


Figura 4.18 – Grafica del espesor de la pared de la copa para Al 5005. Rojo simulación, negro experimento.

4.4 Discusión

4.4.1 Ensayo de Embutido

El diseño adecuado de las herramientas utilizadas en la prensa troqueladora se confirma en las Figuras 4.2, 4.8 y 4.14. Las copas obtenidas durante el ensayo de embutido no presentan ningún defecto inesperado como arrugas o desgarramiento en las paredes y/o fondo de las copas. Las orejas que se forman son indeseables en la industria, pero no son un defecto, ya que se presentan de manera inherente por la anisotropía del material y son el objeto de estudio para aquellos colaboradores del grupo que se especializan en el modelado. El modo de construcción del troquel no influye en el proceso de embutido, es decir, el hecho de que la copa se estira de abajo para arriba no afecta al proceso y facilita la operación.

Se puede observar en las Figuras 4.1, 4.7 y 4.13 que la velocidad del proceso en la operación del ensayo de embutido es un factor para considerar. Se elaboró el trabajo en una prensa mecánica por lo que no es posible controlar la velocidad con la que se ejecuta el ensayo de embutido, la cual es menor a 1 segundo. Esto es una situación que se asemeja mucho mejor al proceso industrial que la baja velocidad que se utiliza en las máquinas para el ensayo de embutido (Swift). Al ser prensas hidráulicas se puede controlar la velocidad del ensayo de Swift, pero ésta suele ser más bajo de lo que se observa en la producción industrial de piezas embutidas.

Los troqueles que se encuentran en los laboratorios se lograron instrumentar correctamente para poder medir la fuerza de los ensayos. Los resultados correspondientes aún no analizan a detalle, porque el modelo de elemento finito no

toma en cuenta que el sistema del pisador de estos troqueles funciona por resortes. En cuanto se ajusta este detalle en la simulación, se compararán los resultados.

Asimismo, la lubricación del ensayo tiene un papel importante al momento de la medición de fuerza, a la vez de afectar la altura de la copa. Dependiendo del tipo de lubricante el coeficiente de fricción que se presenta en la interacción de las piezas con la lámina puede disminuir de forma significativa, lo que provocaría una disminución en los resultados medidos por la celda de carga. Por mucho que se conoce la viscosidad del lubricante, no existen modelos confiables para modelar el coeficiente de fricción en procesos de embutido. Una vez adecuado el modelo de elemento finito, se puede variar este parámetro para alcanzar un modelo que se ajuste mejor tanto a la fuerza como a la altura de la copa medida.

4.4.2 Digitalización de las piezas

Los resultados obtenidos con el escáner de coordenadas son de alta relevancia, ya que pocos laboratorios a nivel mundial han usado esta técnica para comparar procesos físicos con modelos numéricos en el área de conformado. Sin embargo, aún hay puntos a considerar. Se puede observar en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 que la digitalización de la pieza depende de la base donde se coloque la pieza a escanear, ya que, para este caso, como se necesitó hacer un barrido completo de la pieza para el detalle de los radios y orejas de la copa, se recurrió a una base con tornillo de cabeza hexagonal para levantar la pieza y no cubrir la totalidad de la base, dejando los detalles antes mencionados sin obstáculos. A su vez, la pieza se fijó con pegamento industrial para garantizar que no se moviera durante el escaneo. Sin embargo, por la geometría del tornillo y la poca área de contacto de sujeción, los resultados podrían presentar ligeras inclinaciones, a pesar de tratar de mantener la mayor perpendicularidad con la mesa con ayuda de una escuadra universal. Cabe indicar que, en teoría, el método de análisis de datos corrige esta inclinación. Además, existe la posibilidad de utilizar los puntos medidos en la base de la copa para aún incrementar la precisión del ajuste, sin necesidad de modificar la técnica de medición que se afinó en esta investigación.

En la Figura 3.8, observamos que las copas fueron pintadas en su fondo con pintura negro mate, esto porque al hacer uso del escáner laser, al momento de hacer el barrido en el fondo de las copas, la reflexión del fondo provocaba mediciones erróneas en el interior de la copa (puntos fantasma). El método de análisis de datos utilizado elimina estos puntos, pero la pintura eliminó el problema de puntos fantasma.

Un último punto importante es la capacitación del operador puede tener impacto en los resultados. En su defecto, se puede generar un sobredimensionamiento al recorrer varias veces la pieza o en el caso contrario, de no recorrer bien la pieza con el láser, esta puede presentar agujeros. Estos inconvenientes se superaron,

como lo muestran las Figuras 4.3, 4.9 y 4.15, donde se observa la detección correcta de las zonas de interés las cuales son: espesor de la copa, altura de la copa, posición y altura de las orejas. Se concluye que la obtención de puntos de referencia producto del escáner de coordenadas 3D provee los datos requeridos para poder evaluar la precisión de los modelos y retroalimentar a los modelistas para que se mejoren las aproximaciones en los métodos numéricos.

4.4.3 Comparación entre modelo y simulación

El análisis mostrado en este ensayo de embutido representa resultados positivos, debido a que, como se logra observar en las Figuras 4.5, 4.11 y 4.17 la predicción en la posición de las orejas que se presentan coincide todas las aleaciones con las que se trabajaron; Al 1100, Al 3103 y Al 5005, respectivamente. De misma forma en las figuras antes mencionadas se presentan diferencias en la predicción de altura de las orejas. Para el Al 1100 (Figura 4.5), como se mencionó anteriormente, la altura de la oreja obtenida en la simulación es de 0.20mm y la altura que se presenta en el ensayo es de 1.20mm, teniendo como diferencia 1mm, lo que nos indica que el modelo para simulaciones en chapa de aluminio Al 1100 no logra captar la realidad física de manera precisa.

En el caso del Al 3103 (Figura 4.11), se tienen como resultados en las alturas de las orejas, en la simulación se presenta una altura de oreja de 0.37mm, en cambio, para la altura de oreja del ensayo presenta 0.25mm con un error de porcentaje de 32.43%, el cual a primera impresión parece alto, pero no hay que olvidar que se trata de una diferencia de 0.12mm y que esto está dentro del rango de error de la medición de altura sobre tres copas del mismo material. Se puede cuestionar si, para una variación tan baja de la altura, aún vale la pena analizar las orejas.

Finalizando con los resultados de las orejas en las copas, para los resultados del Al 5005 (Figura 4.17), se observó que los resultados son los que más se asemejan entre modelado y ensayo, teniendo una altura de oreja en la simulación de 2.5mm y para el ensayo de 2.25mm, lo que da un 10% de error de porcentaje, mostrando que el modelo para calcular la anisotropía es adecuado para esta aleación. También en este caso, la diferencia entre modelo y medición está dentro del rango de la variación entre las tres copas analizadas.

En términos de la comparación entre la altura final de la copa mostrada en las Figuras 4.4, 4.10 y 4.16 se presentan desviaciones sistemáticas. para el caso del Al 1100 (Figura 4.4), el resultado de la altura total de la pieza en el modelo es de 28mm a comparación de la altura del ensayo que fue de 25mm lo que nos da un error de porcentaje de 10.71%. En el siguiente caso para el Al 3103 (Figura 4.10), tenemos como resultado para la altura total de la pieza en la simulación 27.5mm el cual se compara con los 25mm de altura total de la pieza obtenido en el ensayo dando como error de porcentaje de 9.09%. Para el Al 5005 (Figura 4.16) se tiene para el modelo

una altura final de la pieza de 28.5mm la cual es comparada con la altura del ensayo de 26mm, obteniendo como error de porcentaje de 8.77

Cabe indicar que una diferencia entre modelo y medición del 10% se considera aceptable. Esto seguramente es el caso cuando se trabajó con el criterio de cedencia de Von Mises y leyes de endurecimiento sencillos. En el grupo de trabajo y la colaboración con las universidades europeas que apoyan el proyecto, las ambiciones son más altas. Para mejorar el resultado, se investigarán el coeficiente de fricción y la fuerza sobre el pisador. Asimismo, se pretende buscar un mejor modelo para las curvas de tracción, ya que la ley de Voce no es idónea para estos materiales.

Continuando con el análisis de los resultados en el espesor de las piezas, mostrados en las Figuras 4.6 (Al 1100), 4.12 (Al3103) y 4.18 (Al 5005), encontramos resultados similares en los tres casos, donde el espesor en las paredes de la copa presenta un comportamiento constante, tanto en el modelo como en el ensayo, pero hay una diferencia clara entre ensayo y modelo. La geometría curva de la pared se debe a la recuperación elástica del material después del proceso. Esta recuperación se manifiesta de manera exagerada en la simulación. Esto puede deberse a diferencias de radios de curvatura, del claro de embutido, de la fuerza del pisador y del coeficiente de fricción. Una fricción excesiva en las partes curvas del punzón y matriz puede inducir un esfuerzo cortante que afecta la recuperación elástica. Gracias a la medición completa de la copa mediante la máquina de coordenadas, se pudo detectar esta diferencia, misma que se tratará de eliminar en simulaciones futuras.

Capítulo 5. Conclusiones

Se corrobora que el diseño de los troqueles funciona correctamente, ya que estos se logran instalar e instrumentar sin ningún problema para la realización del ensayo de embutido debido que las copas obtenidas en los ensayos no presentaron defectos inesperados e incluso otro tipo de operaciones de troquelado para trabajos futuros.

Se logró construir el equipo instrumentado para la medición de fuerza el cual está operando con éxito, ya que en los resultados obtenidos presentan un valor constante y puede ser utilizado para proyectos futuros donde se puedan comparar resultados con mayor número de pruebas.

Haciendo una inspección visual, las copas obtenidas de forma experimental tienen una buena semejanza con las copas simuladas, ya se observa que el tamaño de las orejas que presenta cada caso simulado se asemeja con el tamaño de su respectiva aleación experimental.

La digitalización de las copas de manera detallada requiere de una buena capacitación, como el proceso se desarrolló por primera vez en este estudio, se tuvo que adquirir la experiencia necesaria para obtener resultados que permitan la comparación con las simulaciones.

Para continuar con el análisis de las fuerzas presentadas en el ensayo de embutido, y mejorar la estimación de la altura y el perfil de las copas, se requiere hacer el modelado del pisador por un sistema de resortes e investigar a más detalle el efecto de la fricción, la velocidad de deformación y las leyes de endurecimiento usados.

Por más de 30 años se ha analizado el desarrollo de la predicción del conformado en lámina de aluminio. Asimismo, los métodos numéricos utilizados tienen un desarrollo de más de 30 años. Este proyecto es la primera vez que se ha logrado un análisis completo de un proceso de relevancia industrial, usando varias aleaciones y comparando la medición de la geometría completa de los productos con las simulaciones numéricas usando una paquetería avanzada.

Esto se logró en la facultad de ingeniería de la UNAM, lo que ayuda a que las próximas generaciones de alumnos se inspiren y continúen con el desarrollo de estos métodos. El material desarrollado se puede utilizar para generar prácticas de laboratorio más avanzadas. Esta tesis también puede fomentar el desarrollo en la industria automotriz, ya que, hasta la fecha no hay empresas utilizando estos modelos para sus procesos de manufactura.

Bibliografía

- [1] E. F. Luz López, “Diseño y manufactura de un troquel de corte e instrumentación para la medición de fuerzas”, UNAM, CDMX, 2018.
- [2] D. R. Pichardo Aragón, “Diseño y manufactura de un troquel de embutido e implementación de un protocolo de medición de fuerzas”, UNAM, Ciudad de México, 2018.
- [3] M. Á. Ramírez Toledo, “Modelado del proceso de estampado profundo mediante un código de elemento finito para deformación plástica anisotrópica”, UNAM, CDMX, 2011.
- [4] E. Medrano, “Metalmecánica en México, la comunidad industrial del futuro – Vanguardia Industrial”. Consultado: el 11 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.vanguardia-industrial.net/metalmecanica-en-mexico-la-comunidad-industrial-del-futuro/>
- [5] Y. Teyssier y J. A. Méndez, “La industria metalmecánica y su futuro en México | Contyquim”. Consultado: el 13 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://contyquim.com/blog/la-industria-metalmec%C3%A1nica-y-su-futuro-en-m%C3%A9xico>
- [6] Bardahl Industria, “La industria metalmecánica en México y su panorama económico - Bardahl Industria”. Consultado: el 13 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.bardahlindustria.com/industria-metalmecanica-mexico/>
- [7] I. Lara y Y. Hernández, “El peso de la industria metalmecánica”. Consultado: el 13 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.somosindustria.com/articulo/el-peso-de-la-industria-metalmecanica/>
- [8] D. Casellas, “Nuevos desarrollos, soluciones y retos en conformado de chapa metálica de alta resistencia - Deformación metálica y chapa”. Consultado: el 13 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/303340-Nuevos-desarrollos-soluciones-y-retos-en-conformado-de-chapa-metalica-de-alta-resistencia.html>
- [9] E. Cabrero, “Industria de moldes y troqueles en México | Modern Machine Shop México”. Consultado: el 25 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mms-mexico.com/articulos/industria-de-moldes-y-troqueles-en-mexico>
- [10] J. Gawad, A. Van Bael, P. Eyckens, G. Samaey, P. Van Houtte, y D. Roose, “Hierarchical multi-scale modeling of texture induced plastic anisotropy in

sheet forming”, *Comput Mater Sci*, vol. 66, pp. 65–83, ene. 2013, doi: 10.1016/j.commatsci.2012.05.056.

- [11] G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*, núm. UK. UK: McGraw-Hill, 1961.
- [12] J. L. Flores Alarcón, “Análisis experimental y modelado de un ensayo de deformación cortante en muestras con geometría compleja”, UNAM, CDMX, 2019.
- [13] P. Van Houtte, S. Li, M. Seefeldt, y L. Delannay, “Deformation texture prediction: From the Taylor model to the advanced Lamel model”, *Int J Plast*, vol. 21, núm. 3, pp. 589–624, mar. 2005, doi: 10.1016/j.ijplas.2004.04.011.
- [14] R. Schouwenaars, “Modelado de procesos de manufactura - Notas”, UNAM, CDMX, 2020.
- [15] M. Á. Ramírez Toledo, “Validación de un código de elemento finito para plasticidad anisotrópica mediante ensayos en productos metálicos laminados.”, UNAM, CDMX, 2016.
- [16] M. A. Ramírez *et al.*, “Experimental validation and effect of modelling assumptions in the hierarchical multi-scale simulation of the cup drawing of AA6016 sheets”, *Model Simul Mat Sci Eng*, nov. 2016, doi: 10.1088/0965-0393/25/1/015002.
- [17] Guash Petir A, “Metodologías de modelado y simulación para la mejora de sistemas logísticos y de producción”, 2005.
- [18] C. Marín Villar, “Troqueles y Troquelado, Para la Producción de Grandes Series de Piezas”, 2009.
- [19] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México: McGraw-Hill, 2007.
- [20] Universidad Politécnica de Zacatecas, “Proceso de estampado”. Consultado: el 7 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://estampado394457290.wordpress.com/>
- [21] E. Ukar, S. Martínez, N. Ortega, y A. Lamikiz, “Láser en automoción: procesos en la frontera - Automoción (fabricación)”. Consultado: el 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Sector-Automocion/Articulos/184240-Laser-en-automocion-procesos-en-la-frontera.html>
- [22] E. Bu Osorio y J. Gómez Flores, “Implementación del escáner 3D para generar piezas de repuesto para el laboratorio de tecnología avanzada”, Universidad Tecnológica del Salvador, San Salvador, 2019.

- [23] 3D MetriSoft, “Brazo FARO | 3D Metrisoft”. Consultado: el 21 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cmms.mx/producto/brazo-faro/>
- [24] Ivana. Suchy, *Handbook of die design*. McGraw-Hill, 2006.
- [25] M. Á. Archundia López, “Diseño y manufactura de un troquel de corte con fines didácticos”, UNAM, CDMX, 2015.
- [26] FRANK KINK, *El aluminio y sus aleaciones*, Primera Edición. MEXICO, 1992.
- [27] H. A. Juárez Hernández, “Analysis of the anisotropic plastic deformation during an indentation test using a polycrystalline plasticity finite element code”, CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO, 2018.
- [28] P. Van Houtte, S. K. Yerra, y A. Van Bael, “The Facet method: A hierarchical multilevel modelling scheme for anisotropic convex plastic potentials”, *Int J Plast*, vol. 25, núm. 2, pp. 332–360, feb. 2009, doi: 10.1016/j.ijplas.2008.02.001.