



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

“Construcción del diagrama límite de formado de la aleación de aluminio 6082 mediante simulación por método de elemento finito y validación experimental”.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

Jesús Israel Loredó Pintor

Asesor:

Dr. José Luis Hernández Rivera

San Luis Potosí, S. L. P.

Agosto de 2025



19 de junio de 2025

ING. JESÚS ISRAEL LOREDO PINTOR
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. José Luis Hernández Rivera**, *asesor del Trabajo de Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Metalurgia e Ingeniería de Materiales**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Construcción del diagrama límite de formado de la aleación de aluminio 6082 mediante simulación por método de elemento finito y validación experimental"

Introducción.

- I. Contexto bibliográfico de la formalidad y el establecimiento de diagramas límite de formado en aleaciones de aluminio.
- II. Descripción de técnicas experimentales y computacionales para la determinación de diagramas límite de formado.
- III. Análisis y argumentación de los diagramas límite de formado obtenidos por simulación y experimentación.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZALEZ GALVAN
DIRECTOR



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

D E C L A R A C I Ó N

El presente trabajo que lleva por título:

“Construcción del diagrama límite de formado de la aleación de aluminio 6082 mediante simulación por método de elemento finito y validación experimental”.

se realizó en el periodo enero de 2024 a agosto de 2025 bajo la dirección del Dr. José Luis Hernández Rivera.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Jesús Israel Loredó Pintor.

JESUS ISRAEL LOREDO PINTOR

Tesis JILP versión final TURNITIN.pdf



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:487586262

Fecha de entrega

27 ago 2025, 12:45 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

27 ago 2025, 1:41 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Tesis JILP versión final TURNITIN.pdf

Tamaño del archivo

5.5 MB

122 páginas

23.487 palabras

121.362 caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

- **Caracteres reemplazados**
17 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
- **Texto oculto**
91 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 2% Fuentes de Internet
- 1% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	
www.researchgate.net		1%
2	Internet	
ciep.ing.uaslp.mx		<1%
3	Internet	
1library.co		<1%
4	Internet	
www.iberdrola.com		<1%

Agradecimientos.

Muchas personas fueron indispensables para el desarrollo de este trabajo de investigación, que sin ellas no hubiera sido posible llevarlo a cabo. Expreso mis más sinceros agradecimientos al Dr. José Luis Hernández Rivera por la darme la confianza para desarrollar el proyecto, así como también por las correcciones, observaciones, enseñanzas y tiempo dedicado en el asesoramiento de la tesis.

Agradezco también al SECIHTI por el apoyo económico durante la duración del posgrado, con número de CVU: 1312846 y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en esta institución.

Extiendo mis agradecimientos al Instituto de Metalurgia de la UASLP por la facilidad en el uso de las instalaciones. A los técnicos: M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar por apoyarme en la caracterización vía difracción de rayos X, a M.M.I.M. Claudia Elías Hernández por el apoyo en el recubrimiento de muestras para MEB. Al señor Alfredo Ruiz Prado y a M.M.I.M Lorena Hernández Hernández por la ayuda en la preparación metalografía de muestras y reactivos de ataque químico. A Jesús Flores Sandoval y Juan Zaragoza por el arduo trabajo de maquinado de herramental y corte de muestras, además, de su capacitación para el uso de equipos en el taller de maquinado. Agradezco también al personal administrativo: Nalleli Madai Martínez Sánchez y María J.C. Guadalupe Moya Zertuche por sus atenciones en los procesos administrativos.

Asimismo, quiero dar gracias al Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia, responsable del CCIM de la UASLP, y a Eliuth Espericueta López por la asistencia en pruebas mecánicas.

Quiero agradecer también a mi comité de sinodales: Dra. Esperanza Elizabeth Martínez Flores, Dr. Mitsuo Osvaldo Ramos Azpeitia y Dra. Lilia Narváez Hernández, por sus valiosas correcciones y aportaciones durante las revisiones de avance de tesis.

Por último, expreso mi más sincera gratitud a mis amigos y compañeros Olga, Chava, Rosy, Luis, Frida, Ahtzyri, Alondra, Carlos, Salma, Jaime, Andrea y Leo, por acompañarme en el transcurso de los dos años de maestría.

A mis padres y hermanos, Silvia, Santos, Fernanda y José. Por siempre apoyarme en cumplir cada uno de mis sueños. Por estar presentes y mostrarme su cariño. Con mucho amor, es por y para ustedes.

Resumen.

En este trabajo se utilizó el software DEFORM-3D v.11 para simular, mediante el método de elementos finitos (*Finite Element Method, FEM*), la prueba de Nakazima para obtener el diagrama límite de formado (*Forming Limit Diagram, FLD*) de la aleación de aluminio 6082-T6, el cual fue comparado con FLD determinado experimentalmente utilizando herramentales que fueron diseñados y contruidos para la prueba.

Se evaluaron dos criterios para determinar las deformaciones durante la simulación: El primero fue cuando ocurrió un cambio abrupto en la pendiente de la fuerza durante la prueba de Nakazima, y un segundo criterio cuando la fuerza fue estable tras una deformación avanzada del blanco. El primer criterio mostró mayor concordancia con el FLD experimental, presentando valores de deformación similares en el lado izquierdo y en el punto de deformación plana del diagrama.

Adicionalmente, se optimizaron parámetros del herramental para reducir la carga durante el proceso de sujeción de la lámina. Se determinó que la altura y la posición de la ranura de sujeción influyen directamente en la carga, la cual disminuye al reducirse ambos parámetros. Asimismo, se observó una reducción de la carga al incrementar el tamaño máximo del blanco.

Estos resultados contribuyen a optimizar los procesos de prevención de fallas durante el formado plástico en las industrias de conformado de aleaciones de aluminio. Destacando el uso de programas computacionales de simulación.

Abstract

In this work, the software DEFORM-3D v.11 was used to simulate, using the Finite Element Method (FEM), the Nakazima test to obtain the Forming Limit Diagram (FLD) of the 6082-T6 aluminum alloy. This simulated FLD was compared with the FLD determined experimentally using tooling that was designed and built for the test.

Two criteria were analyzed to determine strains during simulation: (1) The first was when an abrupt change occurred in the force slope during the Nakazima test, and (2) when the force stabilized after substantial blank deformation. The first criterion showed better agreement with the experimental FLD, exhibiting similar strain values.

Additionally, tooling parameters were optimized to reduce clamping load during sheet metal holding. It was determined that both the height and position of the clamping groove directly influence the load, which decreases as these parameters are reduced. Furthermore, load reduction was observed when increasing the maximum blank size.

These results contribute to optimizing failure prevention processes in plastic forming operations within aluminum alloy forming industries, highlighting the value of computational simulation programs.

Contenido

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Listas de Figuras.....	V
Lista de Tablas.	VIII
Introducción.	1
Justificación.	2
Hipótesis.	2
Objetivo General.	3
Objetivos Específicos.....	3
1. Contexto bibliográfico de la formabilidad y el establecimiento del diagrama límite de formado en aleaciones de aluminio.....	4
1.1. Uso de láminas de aluminio.	4
1.2. Aleaciones de aluminio.....	6
1.2.1. Serie 6XXX: composición, propiedades y aplicaciones.	6
1.2.2. Tratamiento térmico T6 utilizado en AA6XXX.....	10
1.3. Procesos de embutido y estirado.	11
1.4. Formabilidad, diagramas límite de formado y prueba de Nakazima.....	14
1.4.1. Diagrama Límite de Formado.	16
1.4.2. Factores que influyen en el FLD.	18
1.5. Uso de la simulación computacional para la construcción de diagrama límite de formado.....	21
1.5.1. Criterios de fractura.	22
1.5.2. Programas basados en el método de elemento finito.	24
2. Descripción de técnicas experimentales y computacionales para la determinación de diagramas límite de formado.....	26
2.1. Caracterización de la lámina.....	27
2.2. Metodología computacional.	29
2.2.1. Simulación de la prueba de Nakazima.....	33
2.2.2. Impresión 3D y manufactura del herramental.	37
2.3. Prueba de Nakazima experimental.	38
3. Análisis y argumentación de los diagramas límite de formado obtenidos por simulación y experimentación.	41
3.1. Condición microestructural del material.	41
3.2. Difracción de rayos X.....	47

3.3. Propiedades a la tensión.	49
3.4. Diseño del herramental y optimización del tamaño máximo de blanco, así como la posición y altura de la ranura de sujeción.	50
3.4.1. Efecto de la altura de ranura en la operación de sujeción.	52
3.4.2. Efecto del tamaño de blanco en la sujeción.....	53
3.4.3. Efecto de la posición de la ranura en la sujeción.	54
3. 5. Simulación del proceso de sujeción.....	55
3.6. Simulación de la prueba de Nakazima y construcción del Diagrama Límite de Formado.	57
3.7. Prueba de Nakazima y medición de deformaciones para construcción del Diagrama Límite de Formado experimental.....	66
Conclusiones.	80
Anexo 1. Cambios en el diseño del herramental.....	A
Anexo 2. Planos de las piezas diseñadas y maquinadas.....	G
Anexo 3. Operaciones de maquinado.	O
Anexo 4. Análisis económico del maquinado y uso del programa de simulación. T	
Referencias.	W

Listas de Figuras.

No. de Figura.	Descripción de Figura.	Página.
1.1.	Partes de automóviles donde se utilizan aleaciones de aluminio [1].	5
1.2.	Relación Mg/Si de distintas aleaciones de la serie 6XXX [4].	7
1.3.	Diagrama del proceso tratamiento térmico T6.	10
1.4.	Proceso de embutido [12].	12
1.5.	Componentes de un troquel	13
1.6.	Defectos que pueden ocurrir durante el proceso de embutido y estirado [16].	14
1.7.	Parámetros que tienen influencia en el formado plástico [16].	15
1.8.	Naturaleza de las deformaciones generadas durante el análisis de rejilla [18].	17
1.9.	Diagrama Límite de Formado [16].	17
1.10.	Pieza fabricada por el proceso de a) embutido [12] y b) estirado [20].	18
1.11.	Factores que afectan el FLD [16].	19
1.12.	Zonas del Diagrama Límite de Formado [18].	20
1.13.	Herramental utilizado para la prueba de Nakazima [18].	21
1.14.	Curva velocidad de adelgazamiento contra tiempo, izquierda. Curva segunda derivada de la velocidad de deformación contra tiempo, derecha [25].	23
1.15.	Grafica fuerza vs tiempo que indica el criterio de inicio de encuellamiento [30].	24
2.1.	Diagrama de flujo de la metodología experimental y simulación seguida en este trabajo.	26
2.2.	Vista isométrica del ensamble del herramental.	29
2.3.	Ensamble del herramental para el proceso de sujeción y prueba de Nakazima.	30
2.4.	Corte transversal del ensamble del herramental.	31
2.5.	Detalle de la posición y altura de ranura.	32
2.6.	Limitante del tamaño mínimo, 63.2 mm, de la posición de ranura.	32
2.7.	Limitante del tamaño máximo de 74 mm, de la posición de ranura.	33
2.8.	Diagrama de flujo de las simulaciones realizadas.	33
2.9.	Longitud y ancho de los blancos utilizados.	34
2.10.	Condición frontera (color verde) donde es aplicada la presión del dado superior para evitar el libre desplazamiento de la lámina en la prueba de Nakazima.	35
2.11.	Perfil de puntos sobre la parte superior del blanco donde se midió la deformación después de la prueba.	36
2.12.	Blancos para la prueba de Nakazima con rejilla de círculos grabada.	39

2.13.	Diagrama de flujo de las operaciones realizadas para obtener el FLD experimental.	40
3.1.	Micrograffías de la lámina de aluminio en estado inicial en dirección normal a la dirección de laminación.	42
3.2.	Microestructura de la aleación AA6082 imagen obtenida por MEB.	43
3.3.	Tamaño y morfología de los precipitados y partículas intermetálicas en la matriz de la aleación.	43
3.4.	Zona de análisis y resultados de EDS para la matriz.	44
3.5.	Zona de análisis y resultados de EDS para el precipitado blanco.	45
3.6.	Zona de análisis y resultados de EDS para el precipitado oscuro.	45
3.7.	Dureza a diferentes temperaturas de envejecimiento por 1 hora para la AA6082-T6 [8].	47
3.8.	Difractograma de AA6082-T6.	48
3.9.	Intensidad de la fase Mg_2Si .	48
3.10.	Curva Esfuerzo real- Deformación real de AA6082- T6.	49
3.11.	Sujetador.	50
3.12.	Punzón.	51
3.13.	Dado superior.	51
3.14.	Herramental después del proceso de sujeción para el blanco de 82x82.	52
3.15.	Corte transversal de la matriz después del proceso de sujeción.	53
3.16.	Efecto de levantamiento sobre la parte central de la lámina durante la sujeción.	53
3.17.	Blanco 82x82 mm después del proceso de sujeción.	54
3.18.	Carga generada durante el proceso de sujeción del blanco 82x82 y 82x10 mm.	56
3.19.	Carga contra desplazamiento para todos los blancos.	57
3.20.	Desplazamiento del punzón que produce la deformación de la lámina para el blanco de 82x82 mm.	58
3.21.	Comparación de la gráfica de fuerza contra desplazamiento durante la prueba de Nakazima para AA6061 [41].	59
3.22.	Estados de deformación y zonas de fractura con diferentes coeficientes de fricción para AA2021 [42].	61
3.23.	Zona de fractura experimentada para un coeficiente de fricción de 0.1 [43].	62
3.24.	Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco para el primer conjunto de deformaciones.	64
3.25.	Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco para el segundo conjunto de deformaciones.	65
3.26.	Blancos utilizados en la prueba de Nakazima después de la prueba.	66

3.27	Efecto del desplazamiento del blanco de 82x58 mm durante la prueba de Nakazima.	67
3.28	Circulo grabado sobre la muestra de 82x82 mm después de la prueba de Nakazima.	67
3.29.	Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco después de la prueba de Nakazima.	68
3.30.	Diagramas límite de formado realizados por simulación y experimentalmente mediante la prueba de Nakazima.	69
3.31.	Microestructura de AA6082-T6 después de la prueba de Nakazima.	70
3.32.	FLD realizado experimentalmente para una lámina de AA6082-T6 con 1 mm de espesor mediante el método de Marciniak [44].	71
3.33.	FLD realizado experimentalmente para una lámina de AA6082 con 1 mm de espesor mediante prueba de estirado de lámina [45].	72
3.34.	Diagrama Límite de Formado para AA6063 [46].	73
3.35.	Figura 3.50. Diagrama Límite de Formado para AA6061-T6 [47].	73
3.36.	Diagrama Límite de Formado para AA6013- T6 evaluado bajo 2 distintos métodos [48].	74
3.37.	FLDs para todas las condiciones de tratamiento térmico de AA2024 -T6 [49].	76
3.38.	FLDs para AA7075 en estado de a) bajo y b) sobre envejecimiento [50].	78
3.39.	FLD obtenido para un acero libre de elementos intersticiales con un espesor de 0.6 mm [51].	79
3.40.	FLD obtenido para un acero micro aleado con un espesor de lámina de 1.2 mm [51].	79

Lista de Tablas.

No. de Tabla.	Descripción de Tabla.	Página.
1.1.	Codificación de las aleaciones de aluminio forjadas [2].	6
1.2.	Efectos de los elementos residuales en la serie de aleación 6XXX [3].	8
1.3.	Composición de aleaciones de la serie 6XXX [3].	9
2.1.	Composición química de la aleación determinada por espectroscopia de emisión óptica, % peso.	27
2.2.	Medidas a considerar en el diseño del herramental	30
2.3.	Parámetros de simulación.	34
2.4.	Horas empleadas por el programa para la simulación del proceso de sujeción y prueba de Nakazima.	37
2.5.	Tipo de acero empleado en la fabricación de las piezas del troquel.	38
3.1.	Volumen de interacción de las posibles fases observadas por análisis EDS.	46
3.2.	Propiedades obtenidas del ensayo de tensión de AA6082-T6.	50
3.3.	Resultados de la simulación variando la altura de ranura. Posición de ranura de 63.2 mm y un blanco de 82x82 mm.	52
3.4.	Resultados de las simulaciones realizadas variando el tamaño de blanco. Altura de sujetador de 0.8 mm y una posición de la ranura de 63.2 mm.	54
3.5.	Resultados de la simulación para el proceso de sujeción variando posición de ranura. Altura de 0.8 mm y blanco de 82x82 mm.	55
3.6.	Carga y levantamiento de la lámina después del proceso de sujeción.	56
3.7.	Valores de fuerza máxima y desplazamiento alcanzados para cada blanco durante la simulación de la prueba de Nakazima.	58
3.8.	Tabla 3.8. Deformación y daño registradas para cada blanco después de la simulación.	60
3.9.	Deformaciones en el blanco de 82x82 mm del primer conjunto de deformaciones obtenidas en la simulación.	63
3.10.	Comparación de DU, DB y DP en distintas series de aleación de aluminio y los diagramas desarrollados en este trabajo.	75
3.11.	Propiedades mecánicas y de formado para AA2024 [49].	77

Introducción.

El aluminio es un material estratégico por su baja densidad, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y alta reciclabilidad, cualidades que lo hacen indispensable en las industrias automotriz, aeronáutica y de la construcción. La serie de aleación 6XXX, es una de las principales aleaciones usadas por la industria automotriz en sus partes estructurales. Es aleada principalmente con magnesio y silicio, que por medio de tratamiento térmico forma siliciuro de magnesio, Mg_2Si , con el objetivo de endurecer la aleación y mejorar sus propiedades mecánicas.

Es fundamental para cualquier tipo de industria predecir los límites de formado en las láminas metálicas, por lo que existen múltiples métodos para evaluar su formabilidad. Una manera de conocer dichos límites es a través de los Diagramas Límite de Formado (*Forming Limit Diagrams, FLDs*). Estos diagramas son una herramienta que ayuda a predecir las fallas en productos formados plásticamente, y en rediseños de los procesos de manufactura. Los cuales, a través de un análisis de rejilla, con círculos grabados sobre la superficie de la lámina, permiten medir la deformación generada en los círculos más cercanos a la fractura. Las deformaciones mayores y menores se grafican en eje Y y eje X respectivamente. De esta forma es posible obtener curvas que delimitan las zonas seguras de formado de las zonas donde la lámina sufrirá la fractura.

La prueba de Nakazima es un ensayo que combina procesos de embutido y estirado, utilizada para obtener los FLDs, que permite generar todo el intervalo del diagrama mediante muestras con diferentes anchos que generan distintos estados de deformación. El lado izquierdo que esta caracterizado por el proceso de embutido y el lado derecho por el proceso de estirado. Debido a la simplicidad de las herramientas, es una prueba ampliamente utilizada. Sin embargo, es complicado en algunas circunstancias, hacer la inversión para hacer la prueba físicamente y es esencial tener un FLD para cada tipo de aleación y espesor de lámina.

Actualmente existen programas de simulación computacional, que ayudan a diseñar y optimizar procesos de formado plástico. Se han estudiados diversos parámetros que tienen influencia sobre los FLDs y para distintas aleaciones, llegando a validar el programa de simulación de forma experimental. Se han obtenido resultados que se correlacionan de forma adecuada, llegando a predecir la fuerza durante el proceso o las

zonas de fractura. Esta herramienta tiene la ventaja de reducir costos y tiempo asociados a pruebas físicas.

Este trabajo tiene como objetivo construir el Diagrama Límite de Formado de AA6082-T6 mediante simulación numérica a través del programa DEFORM-3D v.11 y experimentación, utilizando el método de Nakazima, además, de evaluar parámetros del herramental para optimizar la carga necesaria durante el proceso de formado. Esto beneficiará a las empresas del sector automotriz que podrán predecir posibles fracturas durante sus procesos de manufactura, en el uso de láminas de aluminio que reducen el peso de sus componentes y a su vez, las emisiones de los contaminantes generadas por el combustible utilizado. Este estudio, por tanto, no solo tiene relevancia académica, sino también un impacto ambiental e industrial.

Justificación.

La reducción de peso en componentes automotrices mediante el uso de aluminio permite disminuir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Por lo que, la industria automotriz requiere caracterizar los límites de deformación de la aleación AA6082 para optimizar procesos de formado y garantizar la integridad estructural de los componentes fabricados a partir de ésta. El desarrollo de un diagrama límite de formado permite identificar las zonas seguras de trabajo de la lámina dependiendo del proceso de formado.

Hipótesis.

Será posible usar el método del elemento finito del cual hace uso el programa DEFORM-3D v.11 para construir un Diagrama Límite de Formado para la aleación de aluminio 6082 con tratamiento térmico T6, el cual será verificado con los resultados experimentales de la prueba de Nakazima para un proceso de estirado de láminas.

Objetivo General.

Establecer el Diagrama Límite de Formado de AA6082-T6 mediante pruebas experimentales y simulaciones FEM, utilizando el método de Nakazima, con el fin de evaluar su capacidad de conformado para aplicaciones automotrices.

Objetivos Específicos.

1. Diseñar y construir el modelo numérico de los herramentales para la prueba de Nakazima utilizando el *software* SolidWorks®.
2. Caracterizar las propiedades mecánicas y microestructurales de AA6082-T6.
3. Establecer las condiciones de frontera que permitan el correcto desarrollo de la simulación de la prueba de Nakazima en el software DEFORM-3D v. 11.
4. Construir el Diagrama Límite de Formado mediante simulaciones FEM en el programa DEFORM-3D v. 11.
5. Fabricar mediante maquinado las piezas del troquel y los blancos para realizar la prueba de Nakazima.
6. Realizar pruebas de Nakazima para obtener el FLD experimental.
7. Analizar y comparar los resultados de ambos diagramas generados para validar el método numérico de la simulación.

1. Contexto bibliográfico de la formabilidad y el establecimiento del diagrama límite de formado en aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio, en particular las de la serie 6XXX, han cobrado gran relevancia en la industria automotriz debido a su favorable relación resistencia-peso y su capacidad para sustituir materiales tradicionales como los aceros en componentes estructurales de los vehículos. Este capítulo aborda los fundamentos teóricos y tecnológicos que sustentan la formabilidad de estas aleaciones, con énfasis en la construcción de los FLDs, herramientas esenciales para predecir fallas en procesos de formado plástico.

Se inicia con una revisión de las características de las aleaciones de aluminio, su clasificación y los efectos de los elementos aleantes, especialmente magnesio y silicio, en las propiedades mecánicas y microestructurales. Se profundiza en el tratamiento térmico T6 aplicado en la serie de aleación 6XXX, comúnmente aplicado a estas aleaciones, y su impacto en la secuencia de precipitación de fases como Mg_2Si , clave para el endurecimiento por precipitación.

Posteriormente, se analizan los procesos de embutido y estirado, destacando los parámetros críticos del herramental y los defectos asociados a estas operaciones. La formabilidad se explora a través de métodos experimentales y computacionales, con especial atención en la prueba de Nakazima, ampliamente utilizada para generar FLDs.

Finalmente, se examina el uso de simulaciones por FEM para predecir los FLDs, revisando criterios de fractura y las capacidades de programas como DEFORM-3D v.11.

1.1. Uso de láminas de aluminio.

Las láminas de aluminio son ampliamente utilizadas en diferentes industrias para la fabricación de productos y/o subproductos. Algunos ejemplos de su uso son: en los envases para transportar alimentos y bebidas, en la construcción y arquitectura para revestimientos, techos, aislamientos térmicos y acústicos, en utensilios domésticos como ollas y sartenes o acabado en electrodomésticos, y en la industria del transporte para componentes estructurales y partes superficiales en automóviles y aviones.

En los últimos años, la industria de transporte, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el uso de combustibles fósiles, ha

comenzado a usar en las partes de sus vehículos, aleaciones más ligeras para remplazar los materiales tradicionalmente empleados, como aceros (Figura 1.1). También en el desarrollo de vehículos eléctricos se busca sustituir los materiales de la carrocería por materiales más ligeros, debido a que sus baterías tienen una baja densidad de corriente, por lo que, necesitan una mayor cantidad de baterías y esto a su vez aumenta el peso del automóvil. Las aleaciones de aluminio han sido extensamente usadas en las estructuras de las carrocerías de los autos y aviones, gracias a su baja densidad, relación resistencia-peso y resistencia a la corrosión [1].

En la industria automotriz, han sido investigados los componentes de los paneles exteriores debido a la reducción necesaria en la masa de estos componentes para su fabricación, con la finalidad de reducir el peso de las estructuras. El uso previo de aleaciones de aluminio de alta resistencia ha sido restringido por su baja ductilidad a temperatura ambiente. Sin embargo, el desarrollo de nuevas técnicas de formado ha contribuido para que dichas aleaciones puedan ser aplicadas [1].



Figura 1.1. Partes de automóviles donde se utilizan aleaciones de aluminio [1].

Fabricantes como Jaguar y Audi han incorporado paneles de carrocería y cofres fabricados con aleaciones de la serie 6XXX en sus automóviles, logrando reducciones de peso significativas frente al uso de aceros convencionales [2]. En la industria aeronáutica, AA6082 se utiliza en estructuras secundarias de aeronaves, donde se requiere una buena relación resistencia-peso y resistencia a la corrosión [3].

1.2. Aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio se obtienen al combinar este metal con elementos como cobre, manganeso, magnesio, zinc o silicio. Cada aleante aporta características específicas, por lo que su tipo y proporción determinan variaciones importantes en la microestructura y en las propiedades mecánicas [1].

Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos grupos dependiendo de su proceso de fabricación, fundiciones de aluminio y aluminos forjados. En la Tabla 1.1 [4], se muestra la nomenclatura de las aleaciones de aluminio forjadas, en donde el número de la serie representa el elemento aleante principal de la aleación.

Un ejemplo es el uso del AA6061 en rines automotrices y componentes de suspensión, donde su buena maquinabilidad y resistencia mecánica permiten reducir el peso total del vehículo [5]. El AA2024 y AA7075, aunque no pertenecen a la serie 6XXX, se emplean ampliamente en estructuras aeronáuticas debido a su alta resistencia, lo que contrasta con la serie 6XXX que ofrece un mejor balance entre resistencia, ductilidad y soldabilidad [1].

Tabla 1.1. Codificación de las aleaciones de aluminio forjadas [4].

Aluminio puro >99% pureza.	1XXX
Aluminio aleado principalmente con cobre.	2XXX
Aluminio aleado principalmente con manganeso.	3XXX
Aluminio aleado principalmente silicio.	4XXX
Aluminio aleado principalmente con magnesio.	5XXX
Aluminio aleado principalmente con magnesio y silicio.	6XXX
Aluminio principalmente con zinc.	7XXX
Aluminio aleado con otros elementos (litio).	8XXX

1.2.1. Serie 6XXX: composición, propiedades y aplicaciones.

La serie 6XXX es endurecida por los siguientes métodos junto con el mecanismo de solución sólida [6]:

- Precipitación o endurecimiento por envejecimiento.
- Control de tamaño de grano.

- Trabajo mecánico.

La serie 6XXX tiene como elementos aleantes principales al magnesio y al silicio, ambos elementos tienen la finalidad de formar precipitados de magnesio (Mg_2Si), fase endurecedora que aparece durante el tratamiento térmico de esta aleación. Una relación molar Mg/Si de 1.73 es necesaria para la formación estequiométrica del compuesto intermetálico Mg_2Si . Una mayor cantidad de silicio aumenta la resistencia y la formabilidad, aunque favorece la corrosión intragranular. En cambio, un exceso de magnesio mejora la resistencia a la corrosión, pero reduce tanto la resistencia como la formabilidad [6]. Un aumento en la relación Mg/Si mejora las propiedades mecánicas, pero afecta el envejecimiento, el procesamiento y el tratamiento superficial. La Figura 1.2 muestra la relación de contenido de Mg y Si para las aleaciones de la serie 6XXX [7].

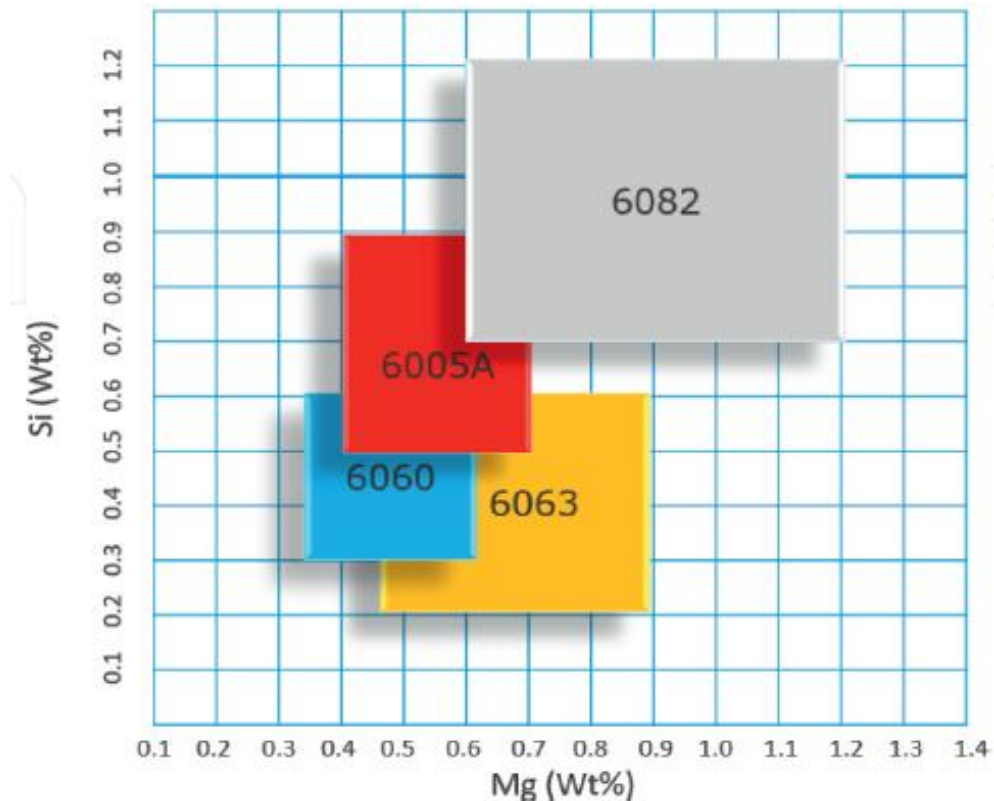


Figura 1.2. Relación Mg/Si de distintas aleaciones de la serie 6XXX [7].

Otro elemento que tiene influencia en las propiedades de la serie de aleación es el cobre, ya que tiene una solubilidad apreciable y efecto de endurecimiento. La adición de diferentes concentraciones produce endurecimiento por precipitación y por solución sólida. En presencia de magnesio y silicio, el cobre produce efecto de envejecimiento a

temperatura ambiente. La resistencia a la corrosión y soldabilidad decrecen y el peso de la aleación es incrementado [6].

La AA6082-T6 se emplea en la carrocería de camiones ligeros, así como en la fabricación de piezas de maquinaria ferroviaria debido a su elevada resistencia mecánica [8]. En construcción, se utiliza en perfiles extruidos de esta aleación en andamios y estructuras temporales, donde la ligereza y resistencia a la corrosión es crítica [1].

En la Tabla 1.2 se muestran los efectos que tienen los elementos residuales presentes en la serie de aleación. En la Tabla 1.3 se muestran las composiciones de distintas aleaciones de la serie 6XXX, cada aleación tiene propiedades diferentes debido a los elementos aleantes que tiene cada una de ellas.

Tabla 1.2. Efectos de los elementos residuales en la serie de aleación 6XXX [6].

Elementos aleantes.	Concentración (% peso).	Propiedades.
H	0.0001	Produce formación de poros después de la solidificación. Presencia de S, Mg y Li incrementa la absorción de H. Mientras que Si, Sn, Cu y Be la reduce.
Fe y Si	0.1-1	Promueve la formación de Al_3Fe y $AlFeSi$, que reducen las propiedades de fatiga y fractura.
Na, Li y Ca	<0.01	Incrementan la estructura eutéctica Al-Si resultando en altas propiedades de resistencia. Li incrementa la resistencia a elevadas temperaturas, manteniendo baja densidad.
Ti, V, Cr, Mn	0.001-0.05	Provoca un refinamiento de grano durante la solidificación, retarda la recrystalización durante la deformación. Mn actúa como corrector de la forma de los precipitados de Fe.
Ga	0.001-0.02	El comportamiento en corrosión y ataque químico es alterado en algunas aleaciones.

Tabla 1.3. Composición de aleaciones de la serie 6XXX [6].

Designación	Si	Mg	Cu	Mn	Cr	Otros
AA6003	0.35 - 1.0	0.8 - 1.5	0.1	0.8	0.35	-
AA6005	0.6 - 1.0	0.4 - 0.6	0.1	0.1	0.1	-
AA6053	0.44 - 1.0	1.1 - 1.4	0.1	-	0.15-0.35	-
AA6061	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	0.15 - 0.4	0.15	0.04-0.35	-
AA6063	0.2 - 0.6	0.45 - 1.0	0.1	0.1	0.1	-
AA6066	0.9 - 1.8	0.8 - 1.4	0.7 - 1.2	0.6 - 1.1	0.4	-
AA6070	1.0 - 1.7	0.5 - 1.2	0.15 - 0.4	0.4 - 1.0	0.1	-
AA6101	0.3 - 0.7	0.35 - 0.8	0.1	0.03	0.03	B ≤ 0.06
AA6105	0.6 - 1.0	0.45 - 0.8	0.1	0.1	0.1	-
AA6151	0.6 - 1.2	0.45 - 0.8	0.35	0.2	0.15-0.35	-
AA6162	0.4 - 0.8	0.7 - 1.1	0.2	0.1	0.1	-
AA6201	0.5 - 1.0	0.6 - 1.0	0.1	0.03	0.03	B ≤ 0.06
AA6253	0.4 - 1.05	1.0 - 1.5	0.1	-	0.04 - 0.35	Zn 1.6 - 2.4
AA6262	0.4 - 0.8	0.8 - 1.2	0.15 - 0.4	0.15	0.04 - 0.14	Pb y Bi 0.4 – 0.7
AA6351	0.7 - 1.3	0.4 - 0.8	0.1	0.4 - 0.8	-	-
AA6463	0.2 - 0.6	0.4 - 1.0	0.2	0.05	-	-
AA6082	0.7 - 1.3	0.6 - 1.2	≤ 0.10	0.4 - 1.0	≤ 0.25	Fe ≤ 0.5

Algunas propiedades de la serie de aleación 6XXX son las siguientes: buena capacidad de soldabilidad, resistencia a la corrosión y formabilidad, son muy aptas para procesos de extrusión y forja en caliente, además, de tener facilidad para el trabajado en frío. Es ampliamente utilizada en estructuras, marcos y ventanas, y es aplicada también en la industria arquitectónica, debido a su conductividad térmica que ayuda a disipar el calor, además son utilizadas para lámparas o carcassas para alumbrado público [6].

1.2.2. Tratamiento térmico T6 utilizado en AA6XXX.

Las aleaciones de la serie 6XXX son endurecidas por precipitación y tratadas térmicamente por un proceso designado como T6, el cual consiste en tratamiento térmico de solubilización, temple y envejecido artificial [6], como se observa en la Figura 1.3.

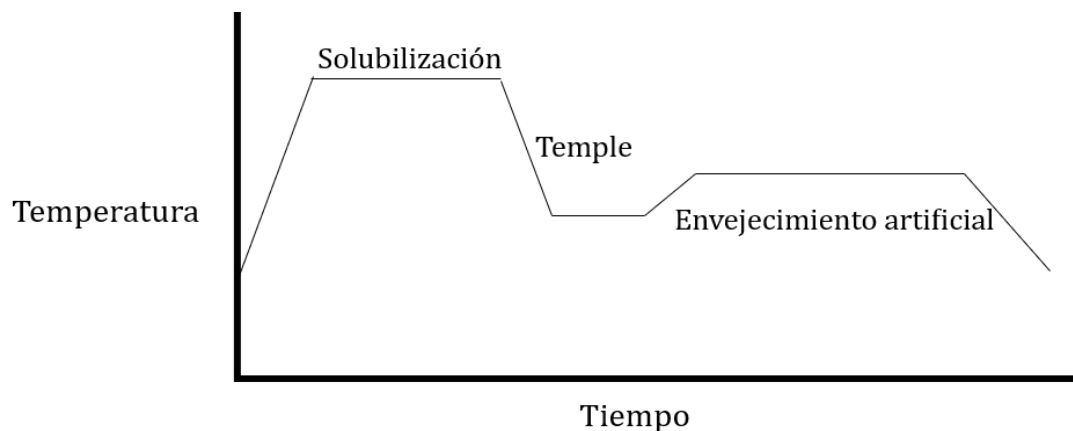
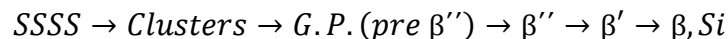


Figura 1.3. Diagrama del proceso tratamiento térmico T6.

La lámina del metal se solubiliza a aproximadamente 495°C, donde los pequeños precipitados de los elementos aleantes contenidos en la aleación se disuelven. Posteriormente, el temple es llevado a cabo en agua, lo que permite mantener la microestructura de la aleación a temperatura ambiente, y, por último, son envejecidas artificialmente a una temperatura de 175°C, este proceso promueve la formación de precipitados distribuidos uniformemente con una morfología determinada [6]. El incremento significativo de dureza, provocado durante el tratamiento térmico es debido a la alta densidad de precipitados en la matriz [9]. El control de las propiedades requiere el conocimiento y entendimiento de la secuencia de precipitación. Para este sistema de aleación la secuencia de precipitación es la siguiente [9]:



Donde SSSS es la solución sólida sobresaturada; *clusters*, son agrupamientos de átomos del elemento soluto (Si); zonas *Guinner-Preston*, es una etapa temprana de la formación de los precipitados, que involucra la formación de regiones enriquecidas del soluto en una escala nanométrica, β'' y β' de composición Mg_5Si_6 y Mg_9Si_5 , son fases metaestables, respectivamente, β es la fase en equilibrio con composición Mg_2Si [9]. Cada etapa de la secuencia es compleja y depende de la composición de la aleación, el tratamiento térmico (incluyendo velocidades de enfriamiento y calentamiento), y del tiempo a temperatura ambiente antes del proceso de envejecimiento [9]. La dureza máxima que es posible obtener en la aleación es con la formación de la fase β'' durante el envejecimiento. Por otra parte, la transformación de la fase β'' a la fase β se define como sobre-envejecimiento, y la estructura cristalina de la fase β , cúbica centrada en las caras (FCC), da como resultado una reducción de la dureza de la aleación [10]. La morfología de la fase de equilibrio Mg_2Si , es en forma de plaquetas, sobre los planos $\{100\}_{Al}$ [11]. El tipo, cantidad, tamaño y distribución de las partículas intermetálicas está estrechamente relacionado con la temperatura y tiempo de envejecimiento [12].

La aleación de aluminio 6082, empleada en partes de la estructura del vehículo, sin ningún tratamiento térmico presenta propiedades mecánicas con valores de 135 MPa de resistencia máxima a la tensión (*Ultimate Tensile Strength*, UTS), una cedencia de 60 MPa y una dureza de 35 HV. Mientras que si la aleación tiene un tratamiento térmico T6 alcanza valores de 310 MPa de UTS, 260 MPa de cedencia y una dureza de 95 HV [13].

Debido a dichas propiedades mencionadas, el uso para esta aleación es en componentes estructurales automotrices como brazos de suspensión y soportes de motor, donde el tratamiento T6 le confiere el desempeño mecánico requerido [5].

1.3. Procesos de embutido y estirado.

El embutido es un proceso de formado plástico mediante el cual las láminas de cualquier material son deformadas en distintas formas geométricas. En este proceso una pieza con determinada geometría, denominada blanco, se introduce en una matriz, la cual le confiere la forma deseada mediante la aplicación de una fuerza por un punzón [14]. Una pieza llamada sujetador, aplica una presión sobre la parte de la lámina que no será desplazada por el punzón, el sujetador mantiene el flujo de metal contraído entre las dos superficies de los dados, para prevenir la formación de arrugas [15].

En la Figura 1.4 se observa un esquema del proceso de embutido. El objetivo es dar forma a la lámina del metal con el menor adelgazamiento posible. Tanto la matriz, como el punzón deben de tener radios adecuados, ya que la pieza puede fallar por esfuerzos de cizalladura si no hay un ángulo adecuado [14].

El proceso de embutido profundo se utiliza para fabricar depósitos de combustible y paneles de puertas de automóvil, mientras que el estirado se aplica en la producción de cofres y techos automotrices, donde se requieren superficies lisas y libres de arrugas [16].

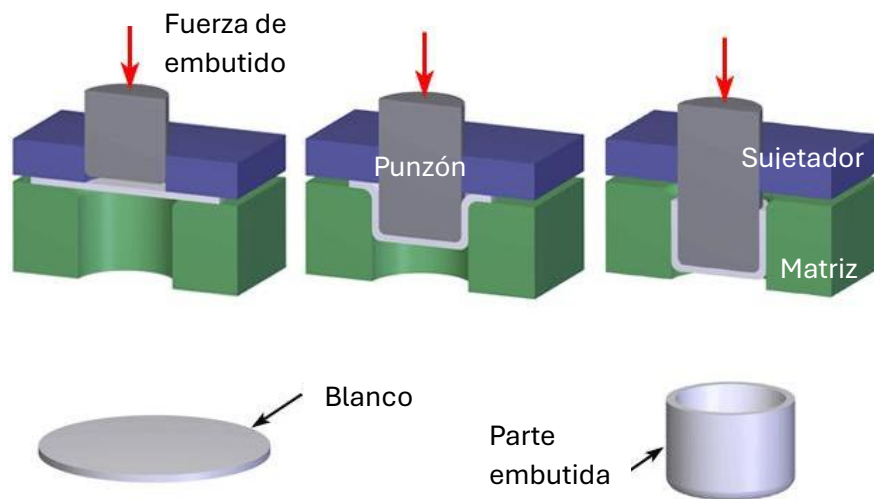


Figura 1.4. Proceso de embutido [17].

En el proceso de estirado, el área superficial del blanco es incrementada como resultado del adelgazamiento generado por la tensión en el metal. Durante el embutido, el metal fluye en el dado, y el blanco cambia de forma, mientras que el estirado, no involucra un movimiento del blanco [15].

Los troqueles utilizados en los procesos de estirado y embutido son muy similares [15]. Un troquel es un conjunto de herramientas, comúnmente llamadas dados, que consiste en un dado superior y un dado inferior, alineados por postes guías. Ambos dados necesitan una placa que contiene agujeros roscados en donde se sujetan tornillos para fijar los dados a una prensa mecánica; estas placas se denominan placa inferior y superior, además se utilizan espaciadores entre el dado y la placa. Los dados utilizados para el embutido provocan el flujo del material en conjunto con el movimiento de un punzón, que es la herramienta que al moverse causa la deformación. Para el proceso de

estirado, los dados superior e inferior, cuentan con una ranura que sujeta la lámina para que no tenga deslizamiento en el proceso [18]. La Figura 1.5 muestra los componentes de un troquel.

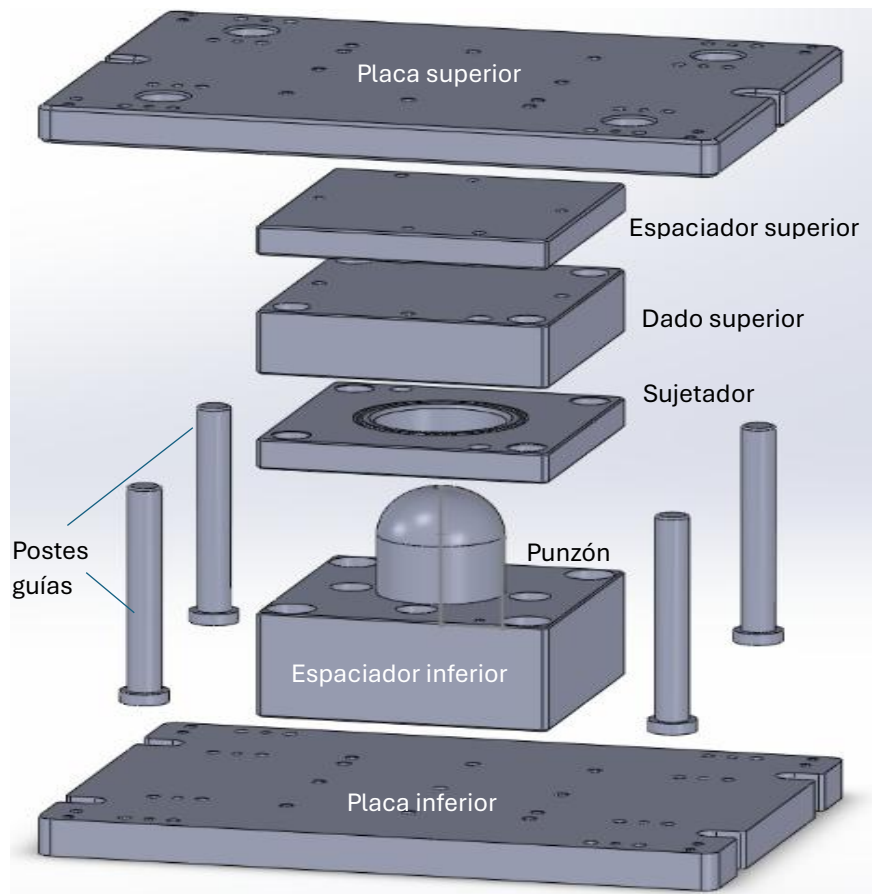


Figura 1.5. Componentes de un troquel.

Existen múltiples parámetros del herramental o troquel, que afectan al proceso debido a la complejidad del mecanismo de deformación elastoplástica involucrada. Algunos de éstos son: el espesor de la lámina, el diámetro del blanco, el diámetro del punzón, el radio del dado, etc. Para conocer el diámetro del blanco, se consideran el diámetro del punzón y el diámetro del sujetador y se utiliza la Ecuación 1 [19].

$$D_o = \sqrt{d_1^2 + d_2^2} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

En donde D_o es el diámetro del blanco, d_1 es el diámetro del punzón y d_2 el diámetro del sujetador. Para calcular el radio del dado a partir del espesor del blanco (h_0) y los diámetros del punzón (d_p) y del blanco (D_0), se utiliza la Ecuación 2 [20].

$$r_0 = 0.035[50 + (D_0 - d_p)]\sqrt{h_0} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

1.4. Formabilidad, diagramas límite de formado y prueba de Nakazima.

La formabilidad se define como la capacidad que tiene una lámina metálica para experimentar deformación plástica hasta alcanzar una geometría específica, sin desarrollar defectos. La Figura 1.6 muestra los defectos que pueden ocurrir en los procesos de embutido y estirado. Los defectos 3, 6 y 8 observados en dicha figura son característicos que sucedan en el proceso de estirado, mientras que los demás son propios del proceso de embutido. El encuellamiento, desgarre, arrugas, modificación de la rugosidad o una mala apariencia superficial, son factores que generalmente definen un límite para la deformación en el estirado [21].

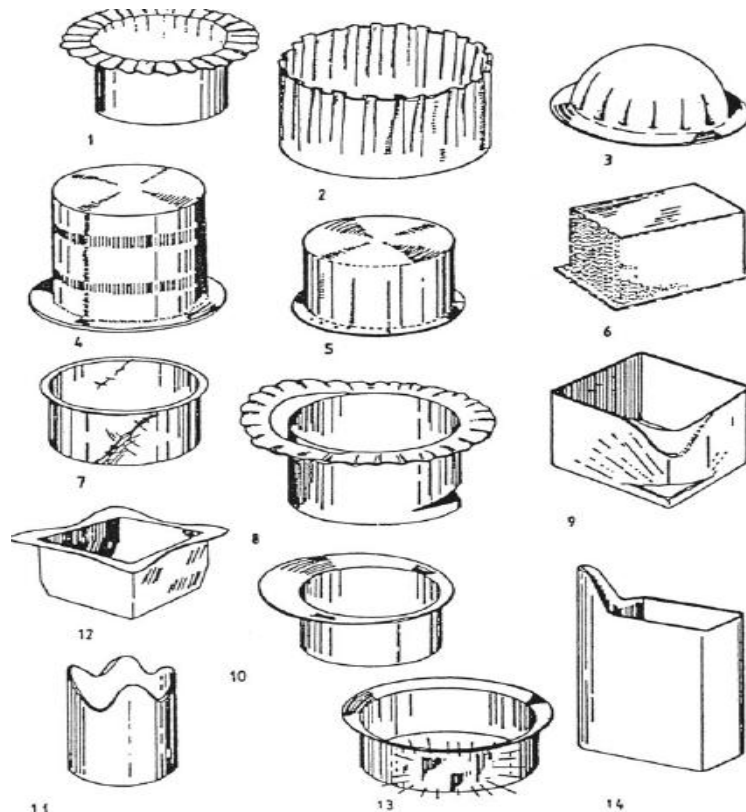


Figura 1.6. Defectos que pueden ocurrir durante el proceso de embutido y estirado [21].

La formabilidad de una lámina metálica depende de parámetros como el coeficiente de endurecimiento por deformación del material, velocidad de deformación, coeficiente de anisotropía y la deformación máxima que se puede aplicar a la pieza. En la Figura 1.7 se

mencionan parámetros adicionales a los ya mencionados que tienen influencia en la formabilidad de las láminas metálicas.

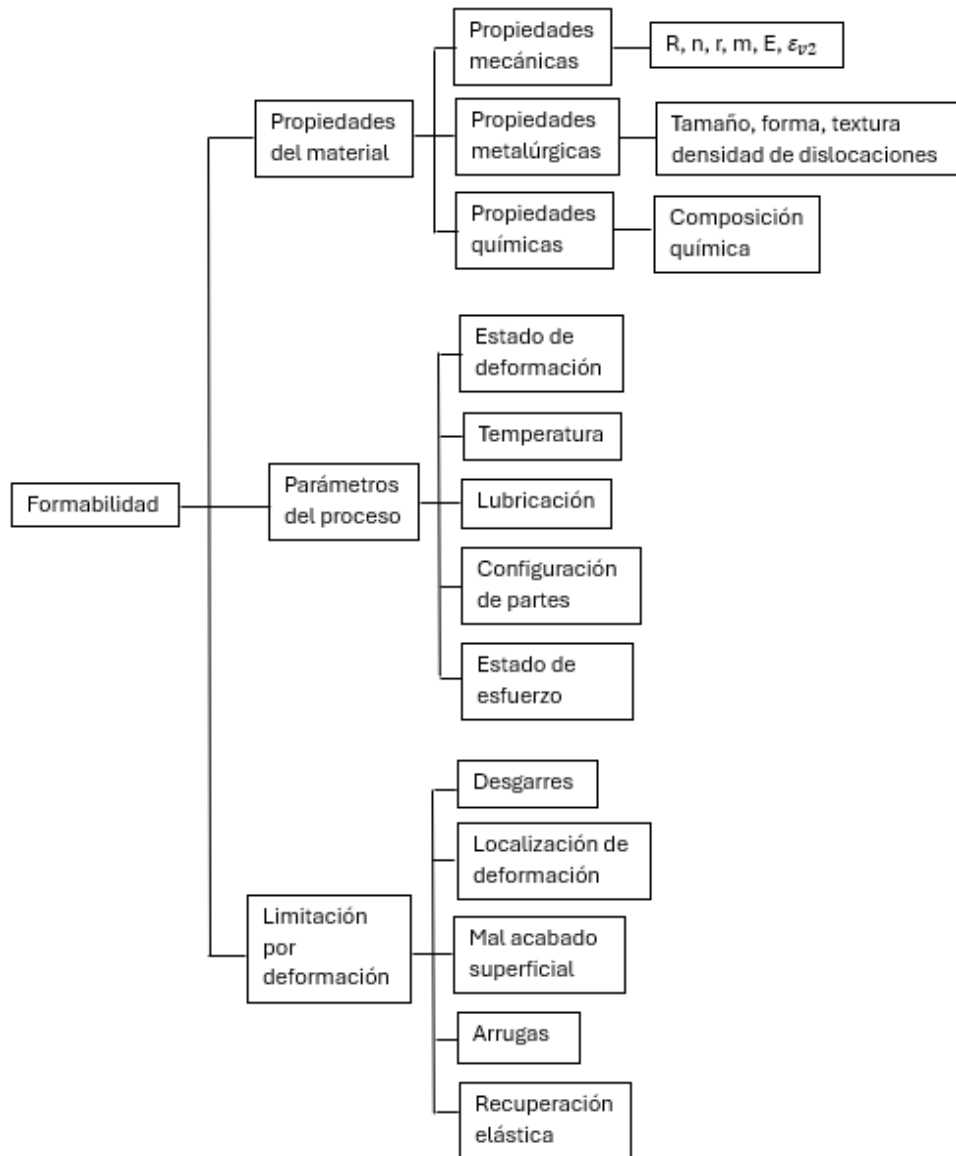


Figura 1.7. Parámetros que tienen influencia en el formado plástico [21].

La formabilidad de las láminas metálicas ha sido estudiada desde mediados del siglo XX, desarrollándose cuatro métodos principales para evaluarla: ensayos simulados, pruebas mecánicas, altura límite de domo y diagramas límite de formado [21].

1. Ensayos simulados. Mediante pruebas experimentales, son simuladas las deformaciones generadas en los procesos de embutido, estirado y doblado. Existen distintas pruebas para cada tipo de deformación.

2. Métodos basados en pruebas mecánicas. El coeficiente de anisotropía, r y coeficiente de endurecimiento, n , están relacionados con la formabilidad. Dichos coeficientes pueden ser conocidos con pruebas de tensión uniaxial [21].
3. Métodos de altura límite de domo. Mediante la deformación de láminas rectangulares, a través de pruebas de tipo Nakazima, se mide la altura alcanzada por las láminas en la prueba, y es trazado un diagrama con la deformación menor y la altura del domo [21].
4. Métodos basados en diagramas límites de formado. Los valores máximos de deformación mayor y menor son medidos, y graficados para conocer los límites de deformación.

1.4.1. Diagrama Límite de Formado.

Las curvas de límite de formado son un criterio para identificar la fractura o falla en el formado de láminas, Keeler-Breizer fueron los pioneros de la investigación acerca de la construcción de estas curvas [22]. Para determinar las condiciones en las que comienza la fractura del material, se graba una rejilla de círculos, la cual es sometida a un proceso de deformación plástica de tipo estirado. A medida que avanza el proceso, los círculos de la rejilla cambian su forma, lo que facilita la visualización y medición de la deformación en un plano. Existen distintas combinaciones de deformaciones mayores y menores que pueden ser encontradas durante el análisis, Figura 1.8. Un caso especial se da en la parte derecha del FLD donde los ejes del círculo después de la prueba son iguales, llamado punto de deformación biaxial (DB). Otro punto importante es el que se encuentra en el eje de las abscisas, llamado punto de deformación plana (DP) o FLD_0 , donde la deformación menor es 0. Del lado izquierdo del diagrama, el estado de deformaciones es positivo en deformación mayor y negativo en deformación menor [21], generando un punto de deformación uniaxial, DU, en donde ocurre tensión en una dirección y compresión en la otra.

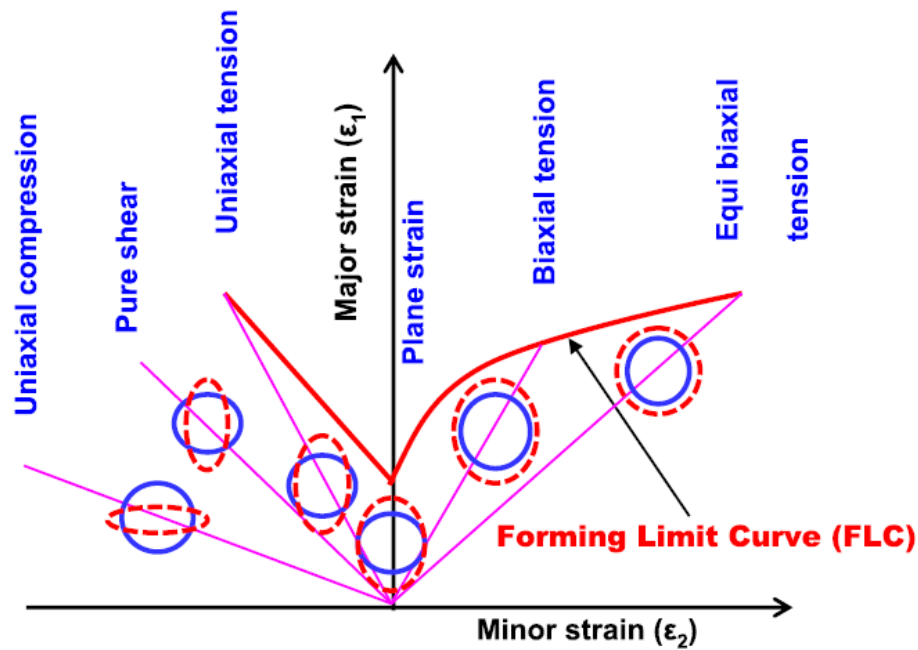


Figura 1.8. Naturaleza de las deformaciones generadas durante el análisis de rejilla [23].

La deformación generada en los círculos después del proceso de formado se mide y se grafica en dos ejes: la deformación menor en el eje X y la deformación mayor en el eje Y. De esta manera, se obtienen las curvas de límite de formado y el conjunto de estas curvas se conoce como diagrama límite de formado (*Forming limit diagram, FLD*) [24], como se observa en la Figura 1.9.

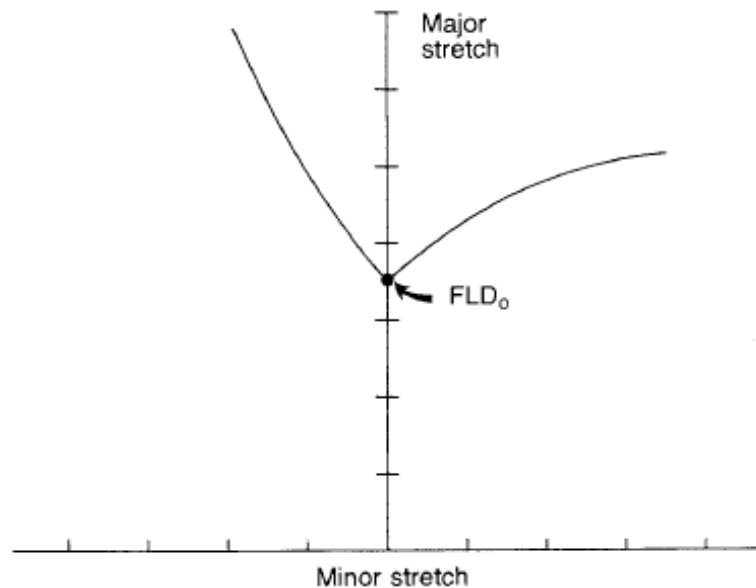


Figura 1.9. Diagrama Límite de Formado [21].

El lado izquierdo del diagrama representa las deformaciones experimentadas en el proceso de embutido, mientras que el lado derecho, las deformaciones generadas durante el proceso de estirado [24]. A diferencia del proceso de embutido, en el proceso de estirado la lámina se sujeta completamente en su circunferencia con un sujetador, lo que impide el movimiento de la lámina. La nueva forma es desarrollada a costa del adelgazamiento en el espesor. La Figura 1.10 muestra un ejemplo de una geometría embutida del lado izquierdo y una pieza estirada en el lado derecho [17]. El FLD separa las combinaciones de deformaciones mayores y menores que se pueden obtener en cada uno de los procesos [24].

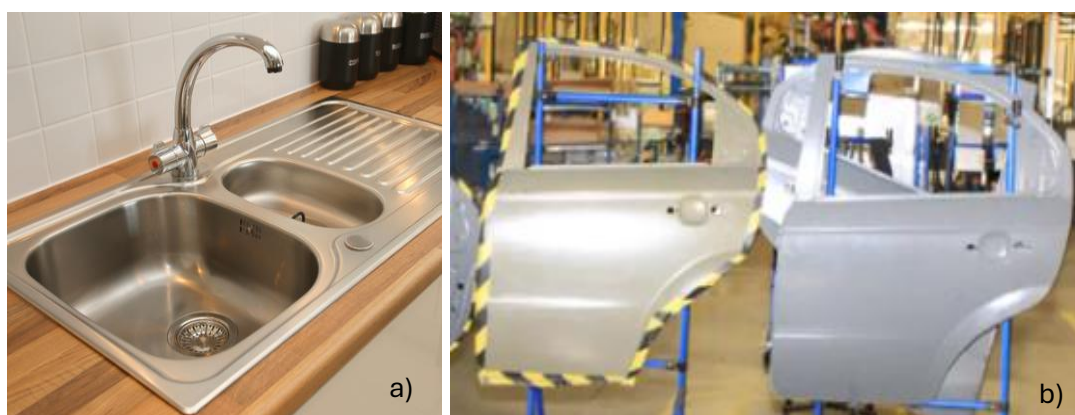


Figura 1.10. Pieza fabricada por el proceso de a) embutido [17] y b) estirado [25].

1.4.2. Factores que influyen en el FLD.

Algunos de los factores que tienen un efecto importante en los FLDs, se muestran en la Figura 1.11. La influencia del espesor es característico debido a que el encuellamiento depende del adelgazamiento de la lámina, entre mayor es el espesor de la lámina las curvas tendrán regiones más amplias en el diagrama. A lo largo del estado de deformación el incremento del FLD es proporcional al incremento del espesor hasta un valor crítico [21]. Para materiales con propiedades mecánicas similares, el FLD también es similar. Al aumentar la anisotropía (r), los límites del diagrama se desplazan a la izquierda y el valor de FLD_0 se incrementa. De igual modo, un mayor coeficiente de endurecimiento (n) incrementa la elongación uniforme y la deformación plana. [21].

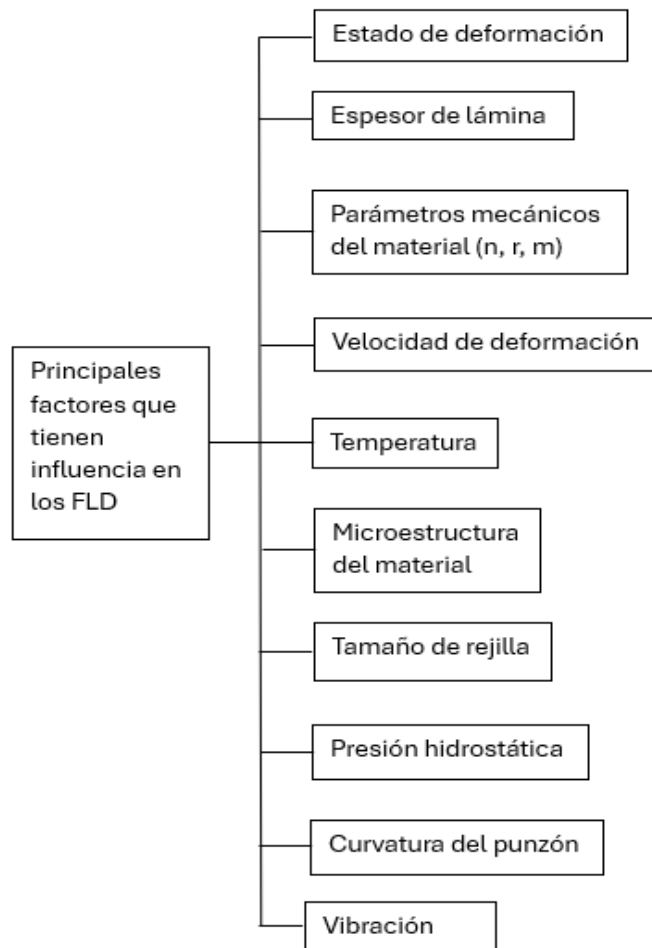


Figura 1.11. Factores que afectan el FLD [21].

La medición de las deformaciones también influye en el FLD, si los círculos de la malla inicial tienen un diámetro, d , la deformación medida es un valor promedio sobre una distancia igual a d . Por lo tanto, en presencia de un gradiente de deformación, un tamaño de malla menor mejora la resolución. Cuando se determina el FLD por medio de encuellamiento, los gradientes de deformación son relativamente bajos. Cuando se determina el FLD por fractura, ocurren gradientes de deformación más altos.

Los diagramas límite de formado son una forma de medir la formabilidad de las láminas, y son utilizados para predecir la probabilidad de fractura y otros defectos en el proceso de formado, como se observa en la Figura 1.12. Además, son una herramienta visual útil para simular operaciones de embutido-estirado, y también en investigación, para evaluar una medida del riesgo de fractura que puede sufrir una lámina al someterse un proceso de formado plástico [22].

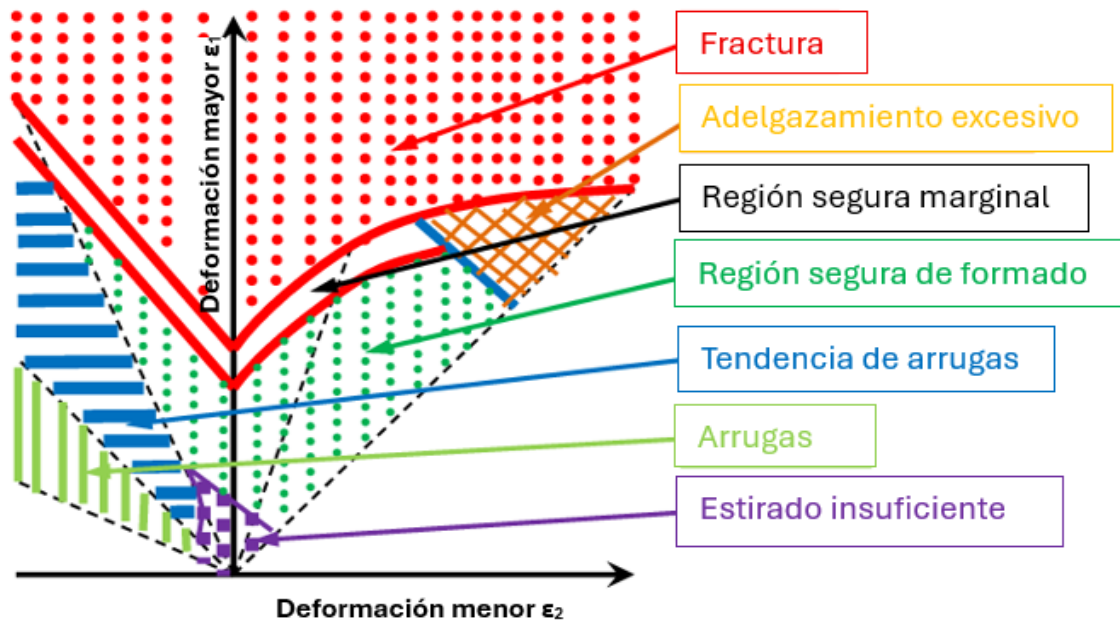


Figura 1.12. Zonas del Diagrama Límite de Formado [23].

1.4.3. Prueba de Nakazima.

Los FLD's pueden ser contruidos por el método de Nakazima, que es un proceso que simula el formado de láminas metálicas, el cual consiste en una combinación de los procesos básicos de embutido y estirado, en donde se ensayan muestras rectangulares con diferentes anchos, usando un punzón semiesférico y un dado circular. Con la variación de los anchos de muestra y el uso de lubricante para eliminar la fricción, se puede obtener el lado derecho e izquierdo del diagrama. La Figura 1.13 muestra el herramental necesario para la prueba, en donde el movimiento del punzón promueve el proceso de embutido al entrar en la cavidad de los dados, mientras que el sujetador de la lámina tiene una ranura circular que empata con la parte superior del troquel, en donde se encuentra una protuberancia con el mismo perfil, de esta manera sujeta y promueve el proceso de estirado. Con la variación de los anchos, es posible obtener los diferentes estados de esfuerzos y deformaciones que corresponden a ambos lados del FLD. Algunas ventajas de la prueba son: la simplicidad de las herramientas y la forma de las muestras, gran variedad de estados de deformación, además de la posibilidad de obtener todo el dominio del diagrama [21].

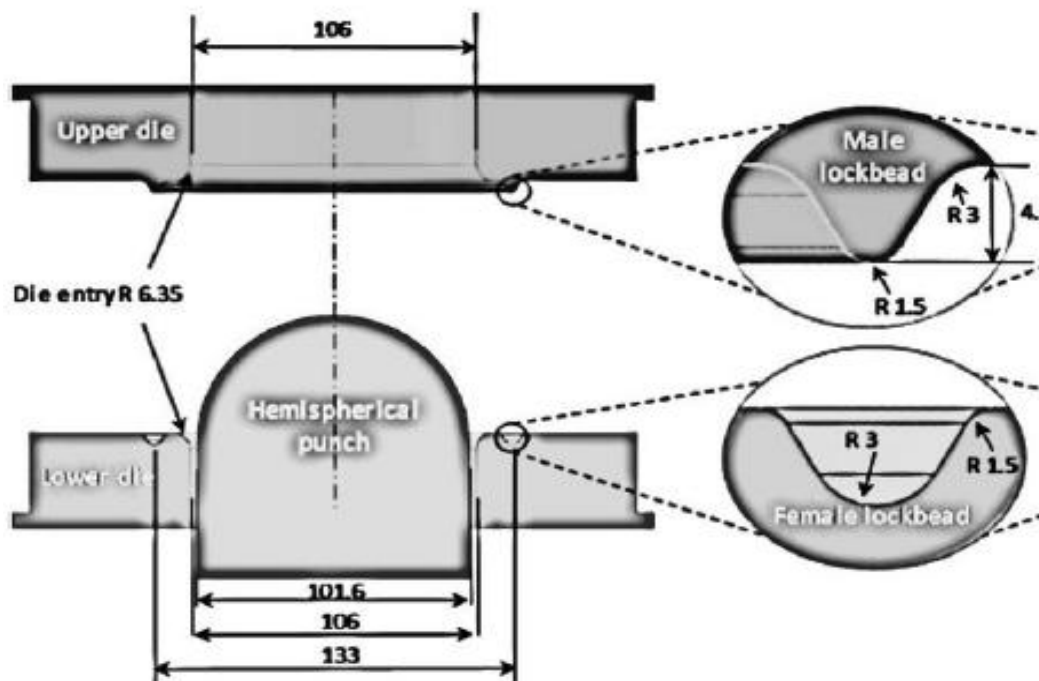


Figura 1.13. Herramental utilizado para la prueba de Nakazima [23].

1.5. Uso de la simulación computacional para la construcción de diagrama límite de formado.

Una forma de conocer cómo es que responderán las aleaciones metálicas ante los procesos de formado plástico, sin la necesidad de realizar los procesos físicamente, es por medio de la simulación computacional. Es costoso contar con los herramentales y/o el suficiente material para hacer las pruebas de manera experimental, lo que dificulta hacer el FLD propio de la aleación, por lo que algunos programas de computación ofrecen una alternativa para simular los procesos de formado y observar el comportamiento que tiene el material durante todo el proceso, además de poder analizar varios parámetros como deformación, transferencia de calor, gradientes de esfuerzos generados sobre la pieza, etc. [1].

El método del elemento finito es una herramienta esencial de computación para resolver problemas estructurales en un amplio campo de aplicación. Permite dividir estructuras en elementos más pequeños, asumir cada elemento para ser un modelo matemático y ensamblar los elementos para resolver los modelos matemáticos en su totalidad [26]. Para procesos de embutido-estirado de láminas, el desarrollo en simulación se ha concentrado principalmente en el modelado de la respuesta tensión-deformación,

endurecimiento y falla de los materiales bajo diferentes condiciones de deformación. Los modelos de materiales desarrollados pueden implementarse en diferentes programas de FEM, para proveer de simulaciones completas y precisas, que puedan predecir la deformación y el comportamiento del material [1].

A través de diversas investigaciones, mediante la simulación del proceso de embutido y/o estirado, se ha logrado predecir satisfactoriamente el comportamiento que se espera de láminas de metal en el proceso de formado, estableciendo así límites en la deformación [27].

En la industria automotriz, en empresas como BMW, hacen uso de programas de simulación por FEM que les ha permitido optimizar el estampado de paneles de aluminio en modelos recientes de automóviles, reduciendo el número de pruebas físicas [28]. En la industria aeronáutica, empresas como Airbus utilizan FEM para diseñar y observar el funcionamiento de partes de sus aviones, lo que les permite ahorrar tiempo y recursos en la comercialización de sus productos [29].

1.5.1. Criterios de fractura.

Predecir la fractura y el encuellamiento en láminas de metal es complicado. El uso de un criterio de fractura es esencial para analizar los resultados de simulación al inicio de encuellamiento. Se han llevado a cabo distintos estudios con diferentes criterios de fractura para predecir los FLDs. Brun et. al. [30], mediante la prueba de Nakazima, determinaron que el adelgazamiento del blanco es un indicador del inicio del encuellamiento. Marklein et. al. [31] utilizando el mismo método para un acero H360LA, encontró que, durante el encuellamiento, el gradiente de deformación mayor cambia rápidamente. El inicio del encuellamiento puede ser detectado por la existencia de inestabilidad en la carga.

D. Lumelskyj et al. [32] determinaron el FLD de un acero DC04, a través de simulación replicando la prueba de Nakazima. Los límites de deformación fueron determinados usando dos criterios, el criterio propuesto por Volk y Hora [33], el cual está basado en el análisis de la velocidad de adelgazamiento, y el criterio propuesto por Situ et. al. [34], en el cual se emplea la máxima aceleración de deformación como indicador de fractura. El límite de deformación en el primer criterio es definido por el punto correspondiente al cambio repentino en la pendiente de la curva de velocidad de adelgazamiento contra

tiempo, como se muestra en la Figura 1.14, lado izquierdo. De acuerdo con el segundo criterio, la localización de la deformación es determinada por el punto de inflexión en la curva de la segunda derivada de la velocidad de deformación, un ejemplo es observado en la Figura 1.14, lado derecho. El modelo que más se aproxima al experimental es el de Volk y Hora [33], mientras que el segundo modelo presenta deformaciones más elevadas en el diagrama [32].

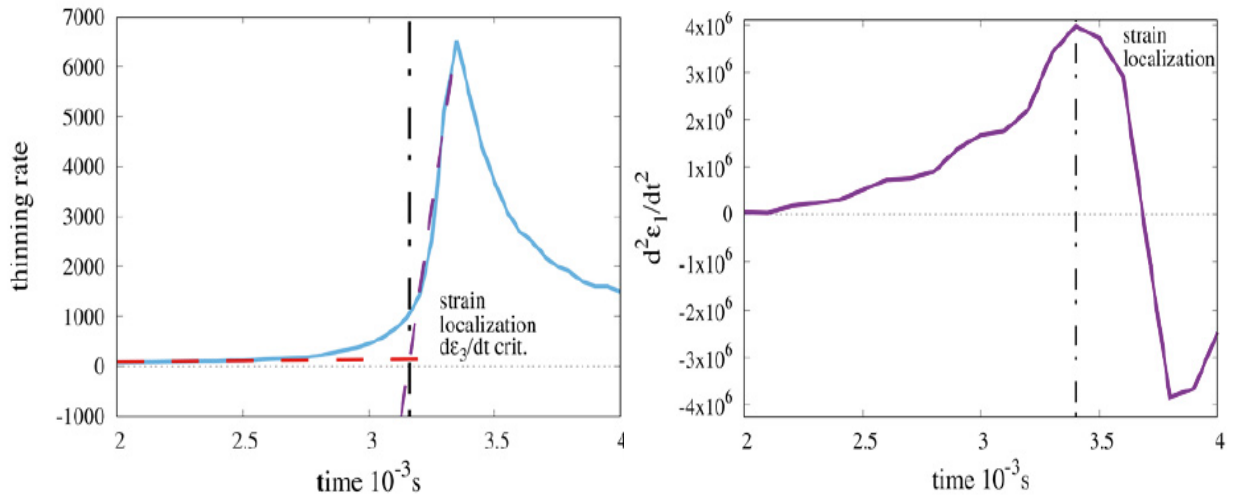


Figura 1.14. Curva velocidad de adelgazamiento contra tiempo, izquierda. Curva segunda derivada de la velocidad de deformación contra tiempo, derecha [32].

Mehdi Safari et al. [35] determinaron el FLD para una aleación de aluminio AA3105 mediante métodos experimentales y simulación numérica, validando criterios de fractura dúctil, entre ellos el criterio de Cockcroft-Latham [35]. El criterio propuesto por Cockcroft-Latham [36] establece que la fractura en materiales dúctiles ocurre cuando la energía de deformación plástica asociada a la tensión máxima (σ_1) alcanza un valor crítico (C_2).

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_{max} d\bar{\epsilon} = C_2 \quad \text{Ecuación 3.}$$

σ_{max} : Tensión principal máxima (en dirección de la deformación principal mayor).

$\bar{\epsilon}$: Deformación plástica equivalente acumulada.

$\bar{\epsilon}_f$: Deformación equivalente en el momento de la fractura.

C_2 : Constante del material, determinada experimentalmente.

Los resultados experimentales mostraron una buena correlación con este criterio de falla, con un error menor al 5% [35].

Mehran Mahboubkhah et al. [37] construyeron el FLD para tres aleaciones de acero de uso automotriz por medio de simulación, validándolo de forma experimental. El criterio para detectar el encuellamiento en la simulación fue el cambio abrupto en la pendiente en el gráfico fuerza contra tiempo de los resultados obtenidos. La Figura 1.15 muestra dicha gráfica y la posición en donde fue tomado el criterio de inicio de fractura, para tomar los valores de deformación y graficar el FLD.

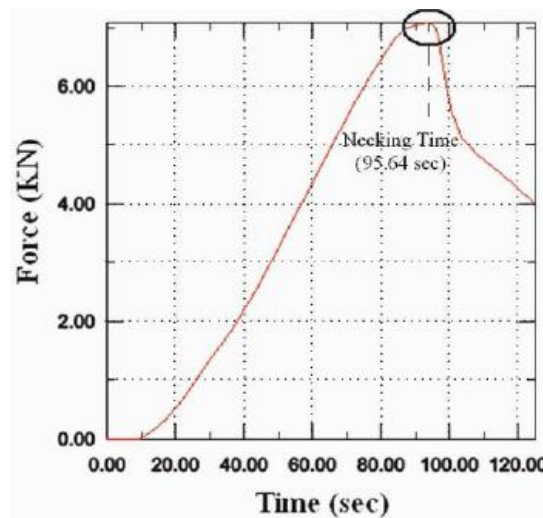


Figura 1.15. Gráfica fuerza vs tiempo que indica el criterio de inicio de encuellamiento [37].

1.5.2. Programas basados en el método de elemento finito.

El programa DEFORM-3D es un *software* basado en *FEM* para simular procesos de deformación elastoplástica bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento. Fue desarrollado por *Scientific Forming Technology Centre (SFTC)*, EUA [38]: El *software* ha sido personalizado para la deformación de productos laminados. Es específicamente designado como 3D, debido a su análisis de flujo de metal en tres dimensiones en los procesos de formado, es una herramienta de gran apoyo para proporcionar datos y análisis del proceso, como: análisis del flujo de material y distribución de temperatura durante el proceso de formado [39].

Rath et al. [38] utiliza este programa para validar la carga predicha por la simulación para un proceso de laminación en caliente para 5 muestras de acero variando el porcentaje de reducción. El valor del coeficiente de correlación entre los datos experimentales y los

obtenidos experimentalmente es de 0.91, mostrando una gran relación entre los resultados. Huang et. al. [39], mediante el mismo programa, analiza la carga en el proceso de laminación de un aluminio 6016, logra establecer el modelo de predicción de la fuerza para la aleación con valores cercanos entre los obtenidos experimentalmente. Otros programas como *ABAQUS* también han sido utilizados para simular procesos de formado y realizar diagramas límite de formado, Prakash et. al. [40] realizaron una investigación sobre diferentes tipos de acero graficando los FLD de cada uno de ellos, teniendo resultados experimentales y de simulación con buena correlación en las curvas de fuerza contra desplazamiento y localización de la fractura, además, de las referencias mencionadas anteriormente [35] y [37], donde son obtenidos diagramas límite de formado.

El uso de estos programas computacionales son una gran herramienta para optimizar recursos como tiempo y dinero, además en el área de investigación para conocer la influencia que tienen diversos parámetros del material como composición química, estado de tratamiento térmico, velocidad de deformación, etc.

2. Descripción de técnicas experimentales y computacionales para la determinación de diagramas límite de formado.

Este capítulo establece las bases metodológicas que permiten contrastar los resultados de simulación con los experimentales, abordados en el capítulo siguiente, y resalta la importancia de integrar herramientas computacionales y ensayos físicos para optimizar procesos de formado.

Se inicia con la caracterización experimental del material, donde a través de microscopia, ensayos de dureza y de tensión se determinaron las propiedades mecánicas de la aleación. Estos datos fueron fundamentales para alimentar los modelos de simulación y asegurar que los resultados fueran representativos del comportamiento real del material.

Posteriormente, se describe el diseño computacional del herramental empleando *SolidWorks®*. Mediante el software *DEFORM-3D*, se simuló el proceso de sujeción y formado de lámina. Se analizaron múltiples configuraciones para seleccionar la geometría más eficiente, validando los resultados con un prototipo impreso en 3D antes de su fabricación en acero.

Finalmente, se detalla la manufactura del troquel y la ejecución experimental de la prueba de Nakazima, donde se midieron las deformaciones en muestras con diferentes anchos para construir el FLD. En la Figura 2.1, se muestra el diagrama de flujo de la metodología seguida en este trabajo.

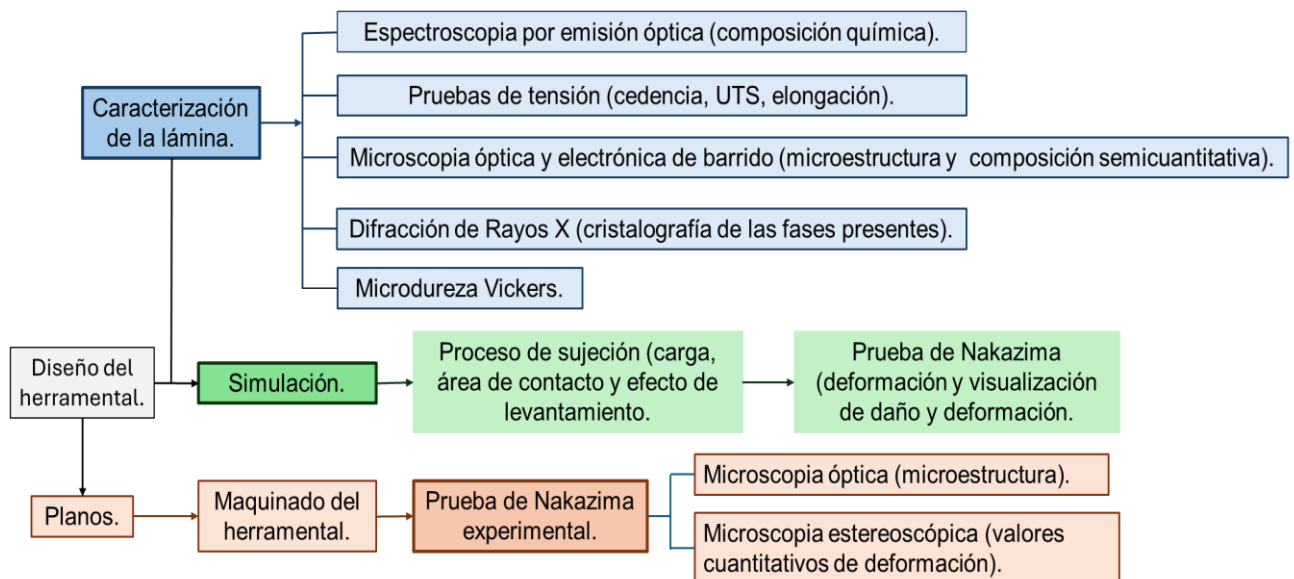


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología experimental y simulación seguida en este trabajo.

2.1. Caracterización de la lámina.

Para esta investigación se usó una lámina donada como parte de una asesoría técnica realizada a una empresa estatal de ramo automotriz. Dicha lámina es utilizada para pruebas de estampado de una pieza de automóvil denominada *Fender*. Mediante espectroscopia de emisión óptica se determinó la composición química de la aleación, la cual se presenta en la Tabla 2.1, y que corresponde a una aleación de aluminio 6082, utilizada en la industria del transporte principalmente en la automotriz en piezas estructurales o de refuerzo como el chasis y bastidores.

Tabla 2.1. Composición química de la aleación 6082 determinada por espectroscopia de emisión óptica (ASTM B209/573-3 [41]).

Elemento.	Símbolo.	Contenido (% peso).	ASTM B209 (requerimiento en % peso).
Silicio	Si	1.04	0.7 – 1.3
Magnesio	Mg	0.698	0.6 - 1.2
Hierro	Fe	0.173	≤ 0.50
Cobre	Cu	0.064	≤ 0.10
Manganeso	Mn	0.063	0.40 - 0.10
Titanio	Ti	0.017	≤ 0.10
Zinc	Zn	0.0026	≤ 0.20
Cromo	Cr	0.0023	≤ 0.25
Aluminio	Al	Balance	Balance

Se realizó una preparación metalográfica de la aleación en las direcciones longitudinal, transversal y normal a la dirección de laminación, para conocer el estado microestructural en que se encuentra. Se desbastó con una secuencia de lijas malla 320 y 600. Posteriormente, se pulió con pasta de diamante de 3 y 1 micras. Se atacó químicamente con reactivo Tucker (5 ml HF, 15 ml HCl, 5 ml HNO₃, 75 ml H₂O) por 10 segundos. Las muestras fueron observadas en un microscopio óptico Olympus Gx51 y en un microscopio electrónico de barrido (MEB) JEOL-6610LV para observar con mayor detalle la microestructura, adicionalmente, se usó espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para determinar la composición semicuantitativa de los precipitados.

La ecuación de Kanaya-Okayama [42] se usa para estimar el volumen de interacción de los electrones con una muestra en el análisis de EDS por MEB.

$$R = \frac{0.0276 A E^{1.67}}{(Z^{0.89} \rho)} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde R, es el volumen de interacción en micras, A es el peso atómico del elemento (g/mol), E es la energía (Kv), Z el número atómico y ρ densidad (g/cm³). Para calcular la densidad, numero atómico y peso atómico promedio de las fases se usa la regla de las mezclas, Ecuación 5.

$$P_c = P_f V_f + P_m V_m \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde P_c es la propiedad de la fase compuesta, P_f y V_f es la propiedad y volumen de la primera fase, y P_m y V_m es la propiedad y volumen de la segunda fase. Para el análisis EDS fueron utilizados 20 kV. De la Ecuación 5, para la fase Mg₂Si una se tiene una densidad de 1.926 g/cm³, un peso atómico de 25.44 g/mol y número atómico promedio de 12.612. Para Al₃Fe₂Si se tiene una densidad de 4.36 g/cm³, peso atómico de 36.76 g/mol y número atómico promedio de 17.49. La matriz presenta una densidad de 2.72 g/cm³, peso atómico 27.14 g/mol y número atómico promedio de 13.08. Se calcularon los volúmenes de interacción de las fases encontradas en el análisis EDS para compararlo con el tamaño promedio del precipitado.

Se realizó un análisis de difracción de rayos X a una muestra de 2.5x2x1 mm preparada metalográficamente, para conocer la cristalografía de los precipitados presentes. El equipo de difracción usado fue un difractómetro de Rayos X Bruker D8, con una fuente de radiación Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). El ángulo de análisis fue de 30-90° y el tamaño del paso fue de 0.05° [43]. Se hicieron ensayos de microdurezas en un durómetro Vickers HMV-G, con 100 gramos de carga y un tiempo de indentación de 10 segundos.

Fueron ensayadas a tensión tres probetas con una longitud calibrada de 25 mm, obtenidas en dirección de laminación en una máquina de tensión universal Shimadzu AG-I según la norma E8-85 [44]. Se determinó la cedencia, el esfuerzo máximo a la tensión y ductilidad de la aleación. Los valores obtenidos se utilizaron para establecer el modelo de material en la simulación del proceso de deformación de la lámina, ya que el programa usado no contaba con las propiedades mecánicas de esta aleación en particular.

2.2. Metodología computacional.

Mediante el programa de dibujo técnico *SolidWorks*®, se diseñó el herramental que fue utilizado en la simulación de la prueba de Nakazima. El tamaño de herramental fue reducido a un 40% del tamaño sugerido en la prueba [23], debido a la limitación de la carga de la prensa que se utilizó en el proceso experimental. Fueron diseñados los siguientes componentes: el dado superior, dado inferior, sujetador, punzón, espaciadores, postes guías y las bases del troquel. Las piezas fueron modificadas reiteradamente debido a los cambios ingenieriles, una descripción de los cambios realizados se muestra en el Anexo 1. La Figura 2.2 muestra el ensamble del herramental con todas las piezas diseñadas.

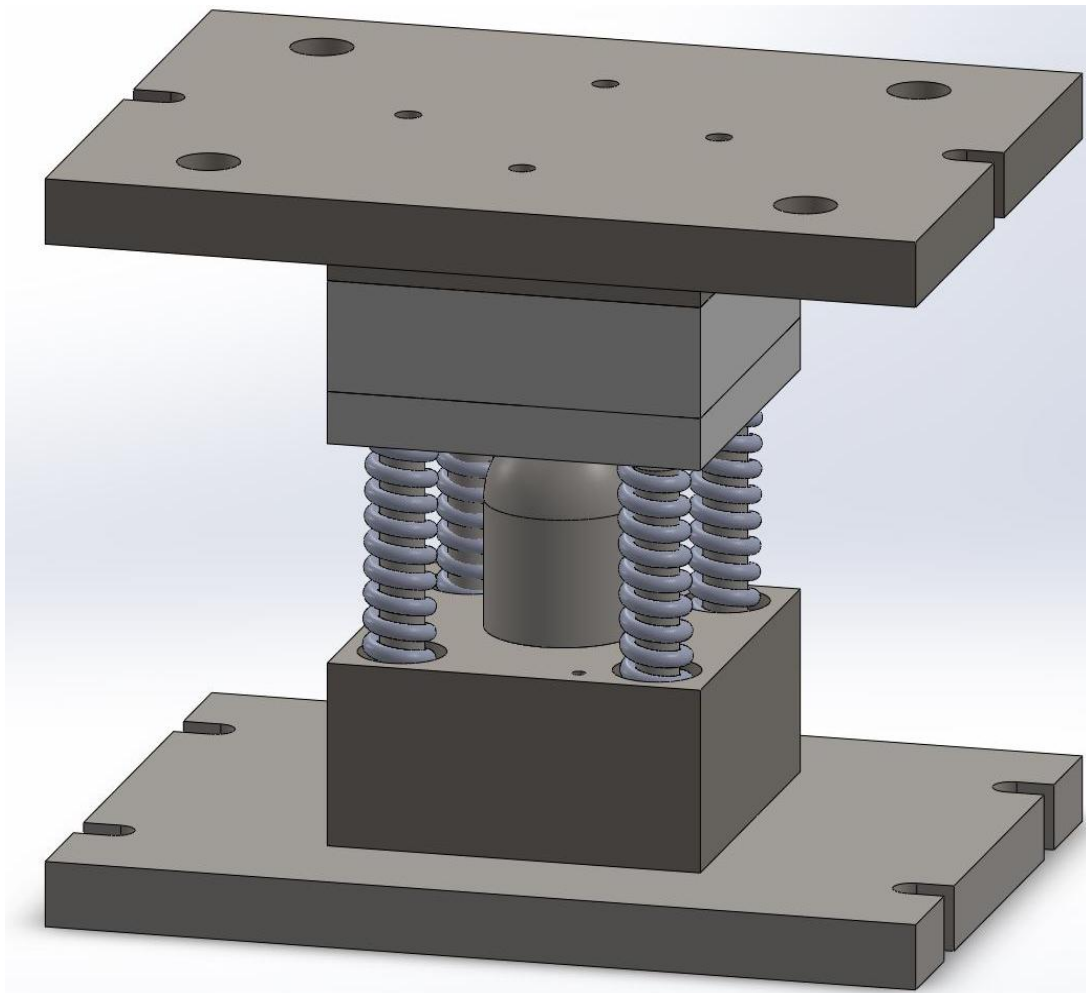


Figura 2.2. Vista isométrica del ensamble del herramental.

Algunas medidas importantes en el diseño de las herramientas son mencionadas en la Tabla 2.2, que fueron modificadas para conocer cómo afectan en la carga de sujeción.

Tabla 2.2. Medidas a considerar en el diseño del herramental.

Radio de entrada al dado superior.	Estará en contacto con la lámina cuando el punzón avance y deforme a la pieza. Fue utilizado un radio de 2.84 mm calculado con la Ecuación 1.
Ranura en dado superior y sujetador.	En una primera etapa del proceso, sujeta a la lámina para evitar su movimiento relativo durante la prueba.

Se realizaron planos ingenieriles con las medidas de las piezas finales que se muestran en el Anexo 2, en donde se observan todas las medidas de los componentes del troquel, como diámetros, longitudes, tipos de roscado y profundidades. Dichos planos se utilizaron como referencia para el maquinado del herramental. La explicación de cada una de las operaciones de maquinado hechas en las piezas se muestra en el Anexo 3.

En el programa *DEFORM-3D v. 11* se realizó el ensamble de las piezas como se observa en la Figura 2.3. En la Figura 2.4 se muestra un corte transversal del mismo ensamble, en donde se observa la altura de la ranura y el espacio que permite el movimiento del punzón en el dado superior.

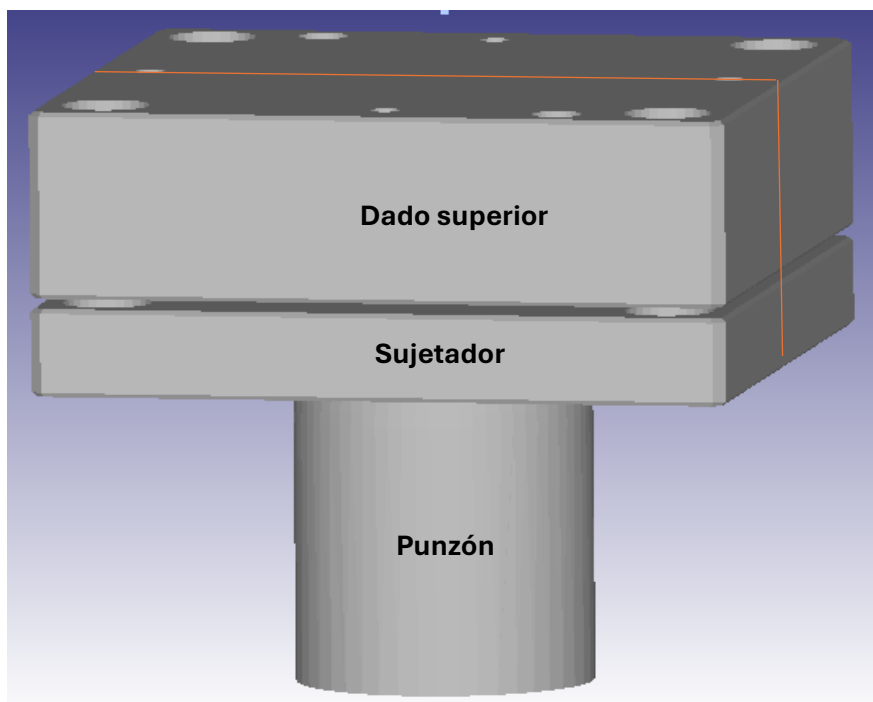


Figura 2.3. Ensamble del herramental para el proceso de sujeción y prueba de Nakazima.

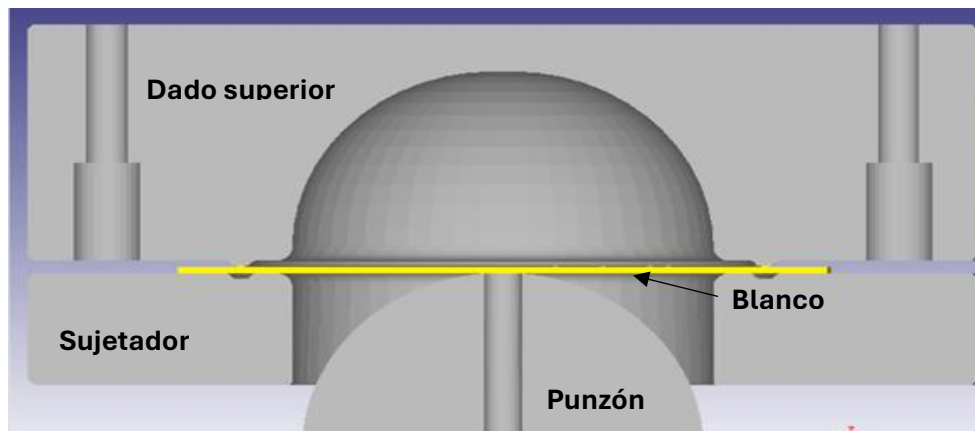


Figura 2.4. Corte transversal del ensamblaje del herramental.

De las curvas de esfuerzo real contra deformación real, resultantes del ensayo de tensión, se seleccionaron valores a partir del esfuerzo a la cedencia de 230 MPa, y hasta el valor del último esfuerzo a la tensión, 350 MPa, para introducirlos al programa de simulación, esto con la finalidad de que el análisis *FEM* sea más representativo de la aleación. El valor de elongación total, 0.27, también se introdujo al programa. Con estas propiedades y usando el diseño de herramientas mostrado en la Figura 2.3, se simuló el proceso de sujeción entre el dado superior y el sujetador en el programa *DEFORM-3D*. La posición y altura de la ranura fueron variando para conocer las condiciones óptimas de carga máxima para el proceso. El espesor del blanco usado fue de 1 mm, correspondiente al espesor de la lámina que fue empleada en la parte experimental. La Figura 2.5 muestra en detalle ambos parámetros, la altura de ranura que será la distancia que baje el herramental para sujetar la lámina, así como su posición.

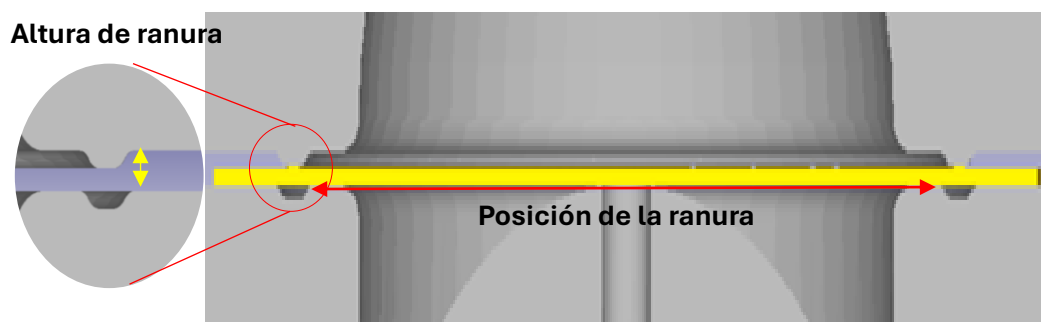


Figura 2.5. Detalle de la posición y altura de ranura.

Un primer grupo de simulaciones fueron realizadas con el objetivo de observar el efecto de la altura de ranura. Se utilizaron alturas de ranura de 2.75, 1.77 y 0.8 mm. El tamaño

de blanco fue de 82 mm, calculado con la Ecuación 2, una posición de ranura de 63.2 mm, la cual es la distancia mínima que permite su manufactura en el dado superior y sujetador, Figura 2.6. La menor fuerza obtenida fue para la altura de ranura de 0.8 mm, fijando este parámetro para las siguientes simulaciones.

Utilizando una altura de la ranura de 0.8 mm y una posición de ranura de 63.2 mm, se realizaron 4 simulaciones, con diferentes tamaños de blanco de 70x70, 74x74, 78x78 y 82x82 mm, con la finalidad de encontrar el tamaño de blanco máximo que minimizara la carga necesaria para el proceso. La fuerza más baja se obtuvo para el blanco de 82x82 mm, por tanto, fue seleccionado este parámetro para las siguientes simulaciones.

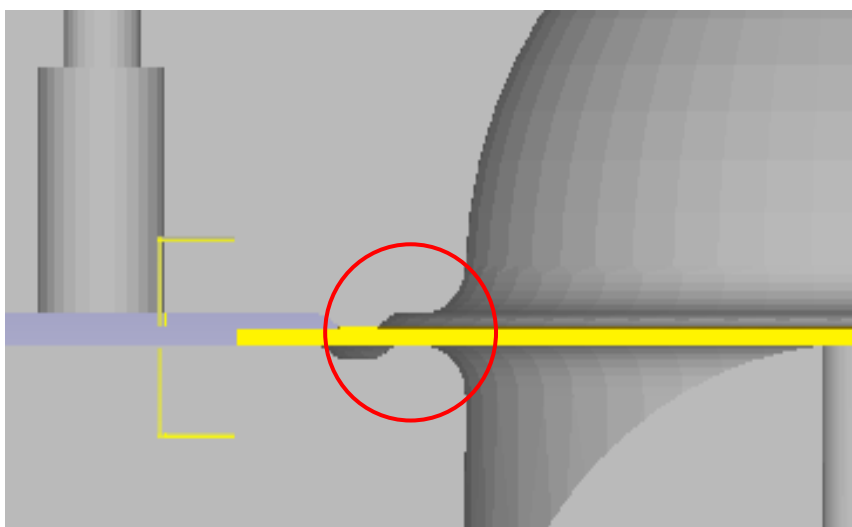


Figura 2.6. Limitante del tamaño mínimo, 63.2 mm, de la posición de ranura.

Con una altura de ranura de 0.8 mm, se realizaron cuatro simulaciones variando ahora la posición de ranura con valores de 63.2, 68.5, 72 y 74 mm. La posición de ranura de 74 mm es el tamaño máximo de este parámetro que puede ser utilizado, debido a que, si es mayor, interfiere con otras piezas del troquel, Figura 2.7. Se compararon valores de carga y área de contacto entre el blanco y las herramientas. Fue seleccionado el diámetro de 68.5 mm, ya que, se obtuvo la menor carga de las posiciones evaluadas después de la posición de 63.2 mm, además se encuentra más alejado del radio del herramental y facilita su maquinado en el dado superior y sujetador. Adicionalmente, registra una mayor área de contacto, lo que indica una mejor sujeción. La Figura 2.8 muestra un diagrama de flujo de cómo se llevaron a cabo las simulaciones, así como la secuencia de variación de los parámetros para conocer las condiciones óptimas del proceso de sujeción.

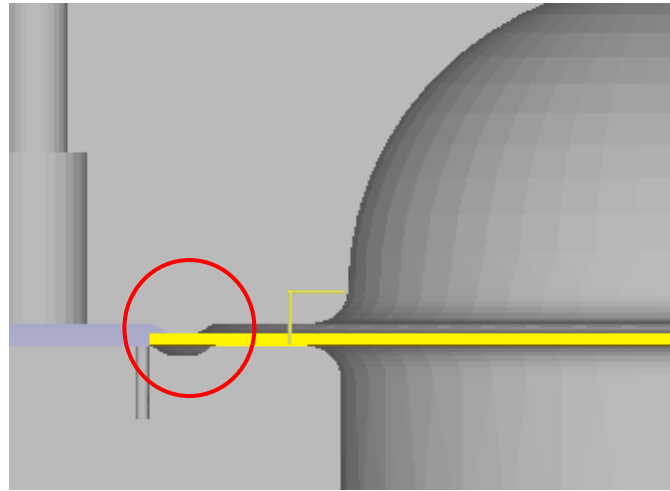


Figura 2.7. Limitante del tamaño máximo de 74 mm, de la posición de ranura.

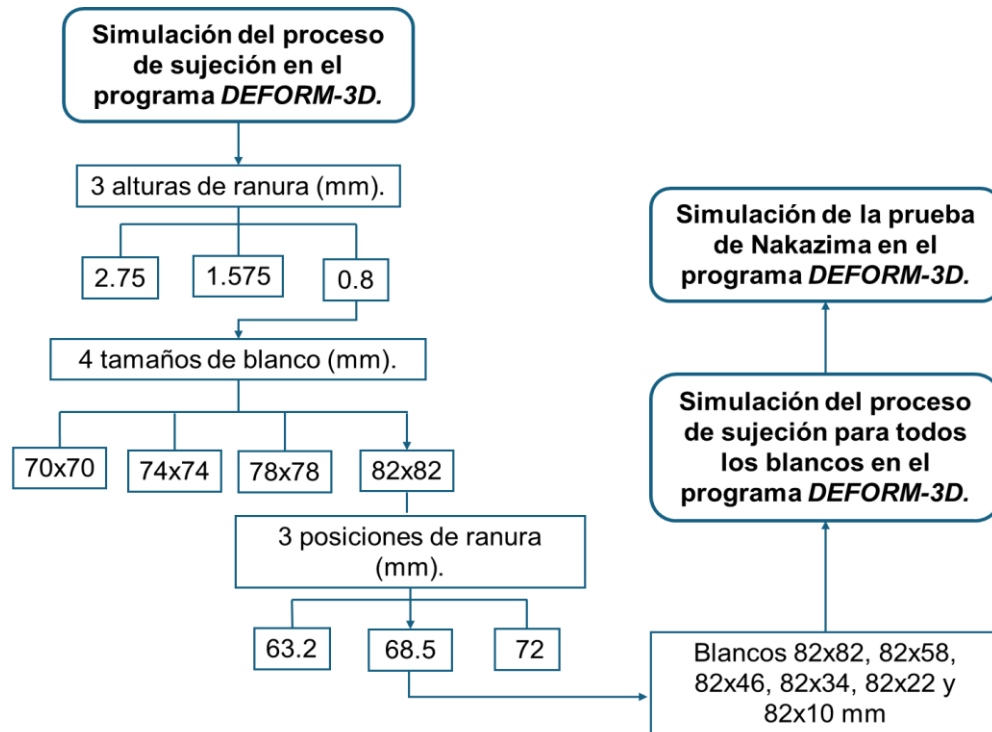


Figura 2.8. Diagrama de flujo de las simulaciones realizadas.

2.2.1. Simulación de la prueba de Nakazima.

Para determinar los anchos de los 7 blancos de la prueba de Nakazima a utilizar, se fueron disminuyendo en intervalos de 12 mm a partir de 82 mm, como lo marca la norma E 2218-02 para determinar las curvas límites de formado [45], que indica una diferencia de 12 mm en el ancho de cada blanco para generar distintas trayectorias de deformación. Los anchos utilizados fueron 82, 70, 58, 46, 34, 22 y 10 mm, como se muestra en la

Figura 2.9. A continuación, se realizó la simulación del proceso de sujeción para cada tamaño de blanco anteriormente mencionado, con la finalidad de conocer la carga necesaria del proceso, y así poder seleccionar el tipo de resorte que en las pruebas experimentales aplicarán esta carga.

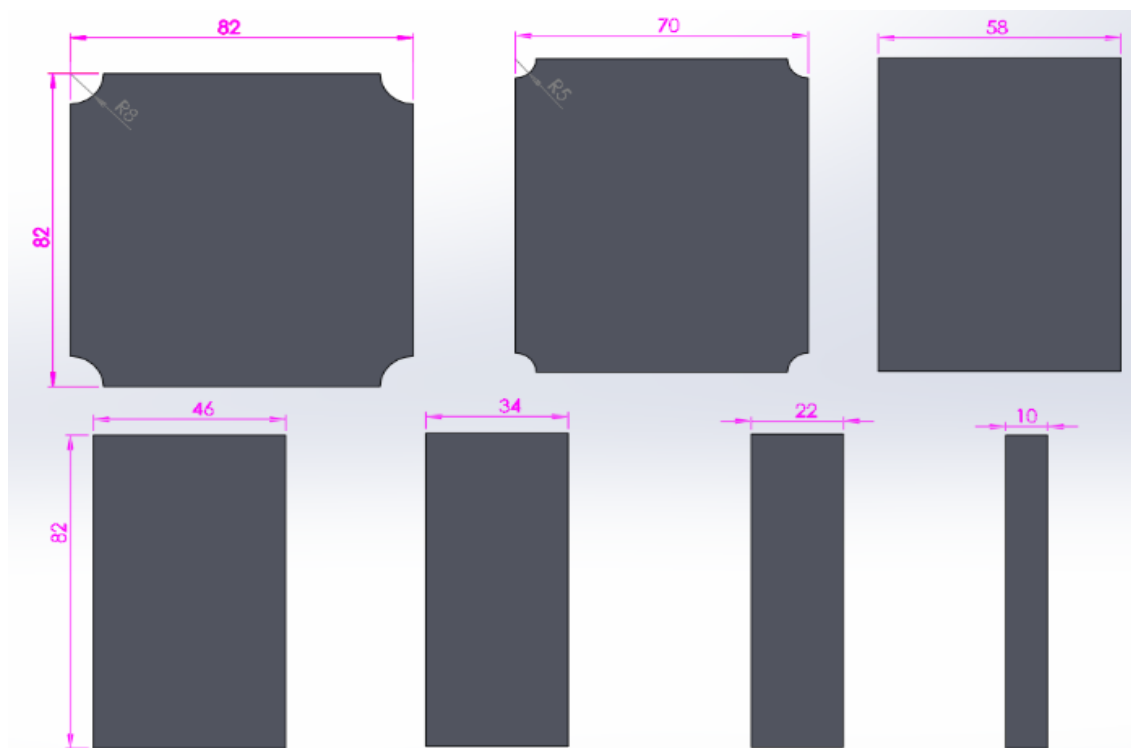


Figura 2.9. Longitud y ancho de los blancos utilizados.

La Tabla 2.3 muestra los parámetros de simulación utilizados en la prueba de Nakazima. El valor de fricción de 0.12 es utilizado en procesos de formado en herramientas de acero [14], los pasos, así como el avance de herramental en la simulación fueron seleccionados por el tamaño de elemento resultante según los elementos empleados

Tabla 2.3. Parámetros de simulación.

Parámetro.	Valor.
Elementos triangulares.	200, 000
Coeficiente de fricción.	0.12
Pasos de simulación.	540
Avance de herramental.	0.05 mm / paso de simulación.

Para prevenir las arrugas durante el proceso de formado, se debe de aplicar una presión de sujeción, que es aplicada por el dado que sujeta la lámina. Se activó una condición frontera donde se aplica una carga de 3 MPa recomendada para aleaciones de aluminio [18], al área que estará presionada por el dado superior y el sujetador, con la finalidad que la única parte de la lámina que se deforme es la que está en contacto con el punzón, como se observa en la Figura 2.10. El área mostrada en color verde es aquella a la que se le aplica la presión, mientras que lo visualizado en amarillo es el área que será deformada por el punzón.

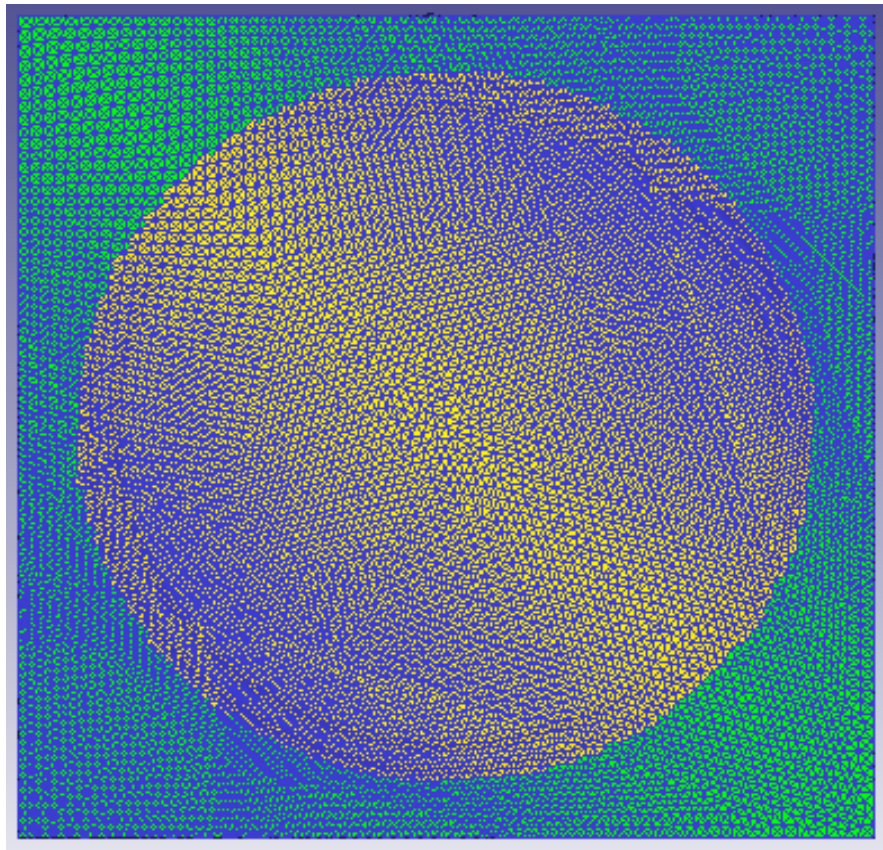


Figura 2.10. Imagen que muestra la condición frontera en color verde, donde es aplicada la presión del dado superior para evitar el libre desplazamiento de la lámina en la prueba de Nakazima.

Se utilizó el modelo de Cockcroft-Latham normalizado para la predicción de la fractura, con un valor crítico de daño, C de 0.27, el cual fue determinado a partir de la elongación total de la probeta del ensayo de tensión de acuerdo con la referencia [46]. Fue utilizado este criterio en simulación debido a que correlaciona la propiedad de elongación total de

la aleación con la deformación que tiene la lámina durante la simulación. Cuando la simulación alcanza dicho valor, los elementos de la malla comienzan a desaparecer, observándose un adelgazamiento y en pasos posteriores, se observan fracturas en la lámina. Posteriormente, fue simulada la prueba de Nakazima para los 7 tamaños de blancos y se realizó un análisis de las gráficas carga contra desplazamiento obtenidas.

Después de la simulación de la prueba del proceso de formado, se realizó un análisis de seguimiento de puntos a lo largo de una cierta dirección para medir las deformaciones obtenidas (Figura 2.11). Fueron seleccionados 25 puntos sobre la superficie de la lámina, a partir del centro hasta un punto separado 10.25 mm de la ranura de sujeción, como se visualiza en la Figura 2.11. Se asignó una separación entre cada punto de 1 mm, porque durante la prueba experimental se grabaron círculos de estos diámetros sobre la lámina, para medir la deformación generada y comparar los resultados.

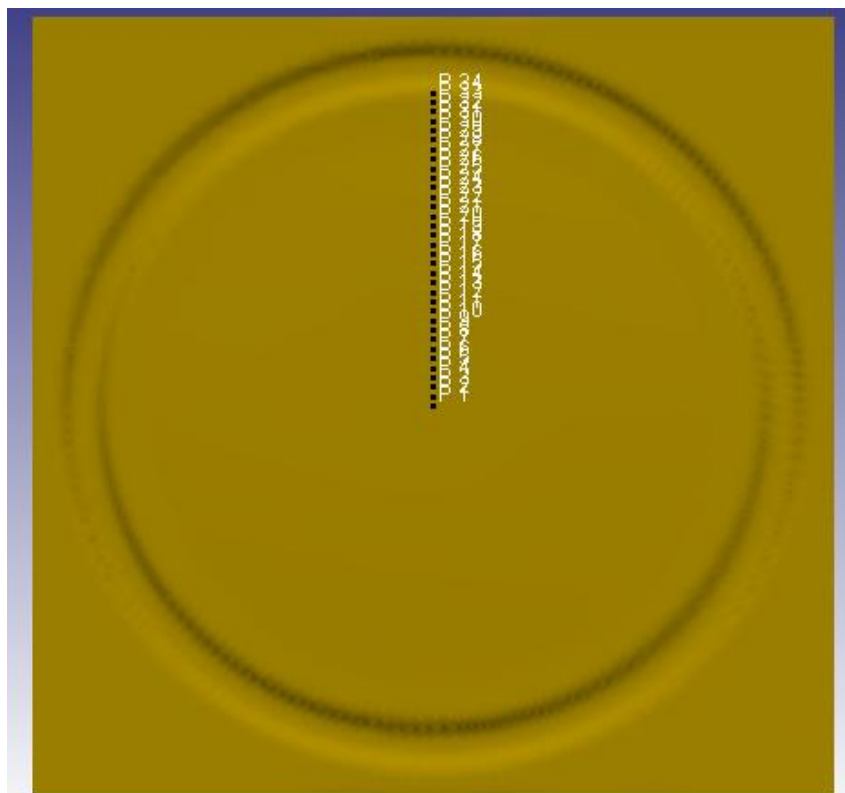


Figura 2.11. Perfil de puntos sobre la parte superior del blanco donde se midió la deformación después de la prueba.

El paso de la simulación seleccionado para medir la deformación depende del comportamiento de la curva de carga contra desplazamiento específico de cada blanco. Fueron tomados dos criterios para tomar dichos pasos. El primero se escogió en donde

se observa una caída en la carga después de alcanzar un máximo, al que se le llamará primer conjunto de deformaciones. Un segundo se seleccionó cuando ocurre una estabilización en la carga en el proceso, al cual se le denominará segundo conjunto de deformaciones, donde se registra una mayor deformación. A través de mapas de contorno de colores se visualizó la deformación y el daño ocasionado en la lámina después de la prueba.

En la Tabla 2.4 se pueden observar las horas empleadas por el programa para la simulación del proceso de sujeción y la prueba de Nakazima. Este tiempo indica las horas de trabajo del programa durante las simulaciones, sin tomar en cuenta el tiempo de pre y post procesamiento. En el Anexo 4 se hace un análisis económico de las horas empleadas por el programa para la simulación de sujeción y prueba de Nakazima, además del tiempo de maquinado de las piezas y la impresión 3D del modelo.

Tabla 2.4. Horas empleadas por el programa para la simulación del proceso de sujeción y prueba de Nakazima.

Proceso	Horas
Sujeción	128
Prueba	578.5
Total	706.5

2.2.2. Impresión 3D y manufactura del herramental.

Se fabricó el prototipo del herramental en una impresora 3D *FlashForge*, utilizando un filamento de PLA con la finalidad de observar las interacciones de movimiento entre los elementos del ensamble, y así poder realizar posibles correcciones de diseño, antes de fabricar el herramental en metal.

A partir de bloques y barras de acero D2, 4140 y 1010, se maquinaron las piezas del herramental. La Tabla 2.5 muestra las piezas y el tipo de acero que fue utilizado en su fabricación.

Tabla 2.5. Tipo de acero empleado en la fabricación de las piezas del troquel.

Tipo de acero	Pieza
Acero D2	Sujetador
	Punzón
	Postes guías
	Dado superior
Acero 4140	Espaciador inferior
	Espaciador superior
Acero 1020	Placa inferior
	Placa superior

El primer paso consistió en reducir las dimensiones de los bloques: en el torno, las barras fueron cortadas a las medidas finales aproximadas de los postes guías y el punzón, posteriormente se rectificaron para darles un adecuado acabado superficial. Luego, se utilizó la fresadora para ajustar el espesor de las placas, dado, sujetador y espaciadores, seguido de un acabado superficial en rectificadora. Además, se taladraron los orificios para los postes guías en el dado superior, dado inferior, sujetador y espaciadores. En las placas, espaciadores y dado superior, se realizaron taladros y roscas para el ensamble con tornillos. Finalmente, se maquinaron la ranura en el dado superior, así como también el orificio para el punzón, la ranura en el sujetador, y las cajas para resortes en el dado inferior y sujetador. Se corrigieron desviaciones en las piezas con lijas de grano fino para su posterior ensamble. Algunas de estas operaciones de maquinado se pueden observar en el Anexo 3.

2.3. Prueba de Nakazima experimental.

Mediante corte láser, se obtuvieron los blancos de AA6082-T6 con las dimensiones requeridas para la prueba de Nakazima, por duplicado. Sobre cada uno se grabó una rejilla de círculos de 2 mm de diámetro, y una misma longitud de separación entre cada círculo. Dichas figuras permitieron cuantificar las deformaciones posteriores a la prueba. Los blancos con la malla de círculos grabados se muestran en la Figura 2.12. Se

ensambló el herramental en una prensa, con capacidad de 20 Ton. Se llevó a cabo el proceso de sujeción de los blancos, y después la prueba de Nakazima.



Figura 2.12. Blancos para la prueba de Nakazima con rejilla de círculos grabada.

Las muestras fueron ensayadas hasta su fractura en los blancos de menor ancho, sin embargo, para las muestras de 82, 70, 58 y 46 mm de ancho, la prensa llegó a su capacidad de carga y no se fracturaron, debido a los resortes utilizados durante la prueba, que debían de proveer la fuerza necesaria de sujeción. Después del ensayo, se midió la longitud final en los círculos con un microscopio estereoscópico con ayuda del *software Camera Measure*®. Este método de medición presenta un posible error debido a la forma de los blancos después de la prueba y del interpretador, que determina las longitudes finales de la figura. Puede tener un impacto en la dispersión de las deformaciones obtenidas.

Los círculos medidos son los más cercanos a la fractura y para los blancos de mayor ancho que no se fracturaron, se midieron los círculos donde el programa predice la fractura, esto provoca discrepancias con los resultados de simulación en el lado derecho del diagrama, por lo que puede ser poco representativo en estos valores. Es recomendable usar resortes con mayor capacidad de carga. Se midieron aproximadamente 6 círculos por muestra. Se calcularon las deformaciones verdaderas con la Ecuación 6, donde $\ln$ es el logaritmo natural, l_f la longitud final y l_i la longitud inicial del círculo. Se graficaron las deformaciones calculadas para trazar las curvas de límite

de formado y el FLD de AA6082-T6. Se compararon ambos diagramas obtenidos por simulación y el obtenido experimentalmente.

$$\text{Deformación real} = \ln \frac{l_f}{l_i} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Se realizó una preparación metalográfica de los blancos después de la prueba, para observar la orientación de los límites de grano generada por la deformación de la prueba.

La Figura 2.12 muestra un diagrama de flujo del procedimiento para obtener el FLD experimental de AA6082-T6.

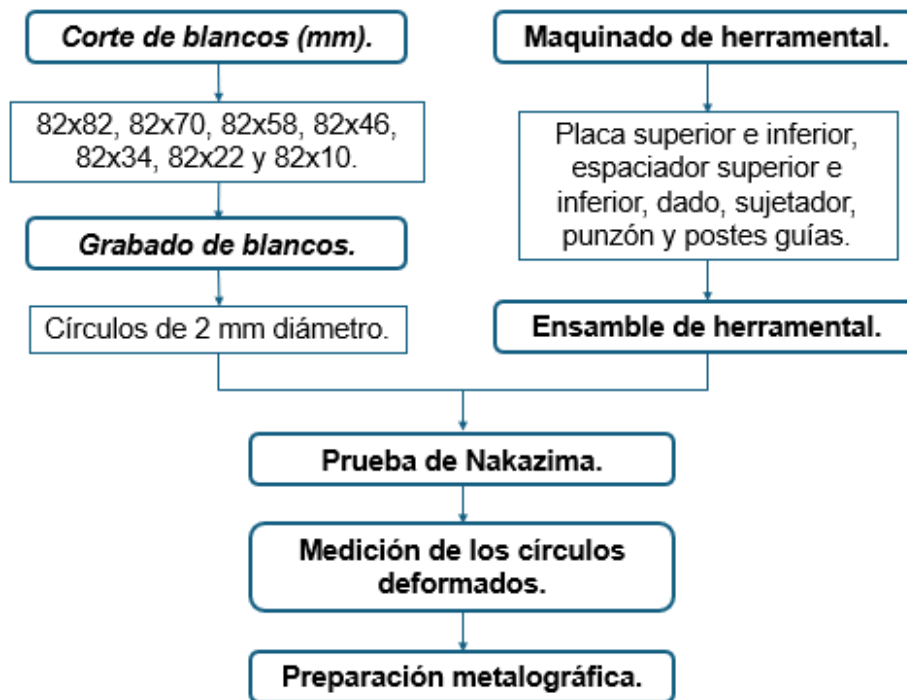


Figura 2.13. Diagrama de flujo de las operaciones realizadas para obtener el FLD experimental.

Utilizar este tipo de herramientas es de gran ayuda para las empresas, ya que antes de realizar el proceso experimental e invertir tiempo y capital monetario, es posible observar defectos o cambios en las piezas. En la industria automotriz, el uso de FEM para procesos de embutido ha permitido a empresas como Volkswagen reducir costos en pruebas físicas, observando el comportamiento de diferentes geometrías en paneles antes de la producción [47]. Es importante complementar las pruebas físicas con programas de simulación que aportan información complementaria sobre la pieza o proceso de manufactura.

3. Análisis y argumentación de los diagramas límite de formado obtenidos por simulación y experimentación.

La validación de los resultados obtenidos mediante simulación computacional y su correlación con datos experimentales es fundamental para garantizar la confiabilidad de los Diagramas Límite de Formado. Este capítulo presenta un análisis de los FLDs desarrollados para la aleación AA6082-T6, contrastando los resultados de las simulaciones con los obtenidos experimentalmente mediante la prueba de Nakazima.

El capítulo inicia con la caracterización de la lámina. Resaltando las características microestructurales que influyen en la formabilidad. Además de las propiedades mecánicas de la aleación que fueron empleadas en la simulación.

A continuación, se discuten los resultados de las simulaciones, comparando los parámetros variados en el proceso de sujeción y los diagramas obtenidos por ambos criterios en la simulación de la prueba de Nakazima. Se realiza la validación por medio de la prueba experimental donde se miden las deformaciones en muestras con rejillas de círculos grabados. Finalmente, se comparan los FLDs obtenidos con estudios previos de aleaciones similares (AA6082, AA6061, AA6063, AA6013), destacando el efecto del espesor, tratamiento térmico y composición química en los límites de formabilidad.

3.1. Condición microestructural del material.

Las micrografías obtenidas por medio de microscopia óptica para AA6082-T6 se observan en la Figura 3.1. Se pueden visualizar partículas intermetálicas y precipitados de tonalidad negra con distinta distribución de tamaño, ya que, hay partículas finas y otras con mayor dimensión. Ambas fases presentan una morfología granular o irregular, distribuidas de manera homogénea. La ausencia de un acomodo preferencial de los precipitados sugiere que la lámina no experimentó deformación previa, indicando un tratamiento térmico posterior a la laminación de la aleación.

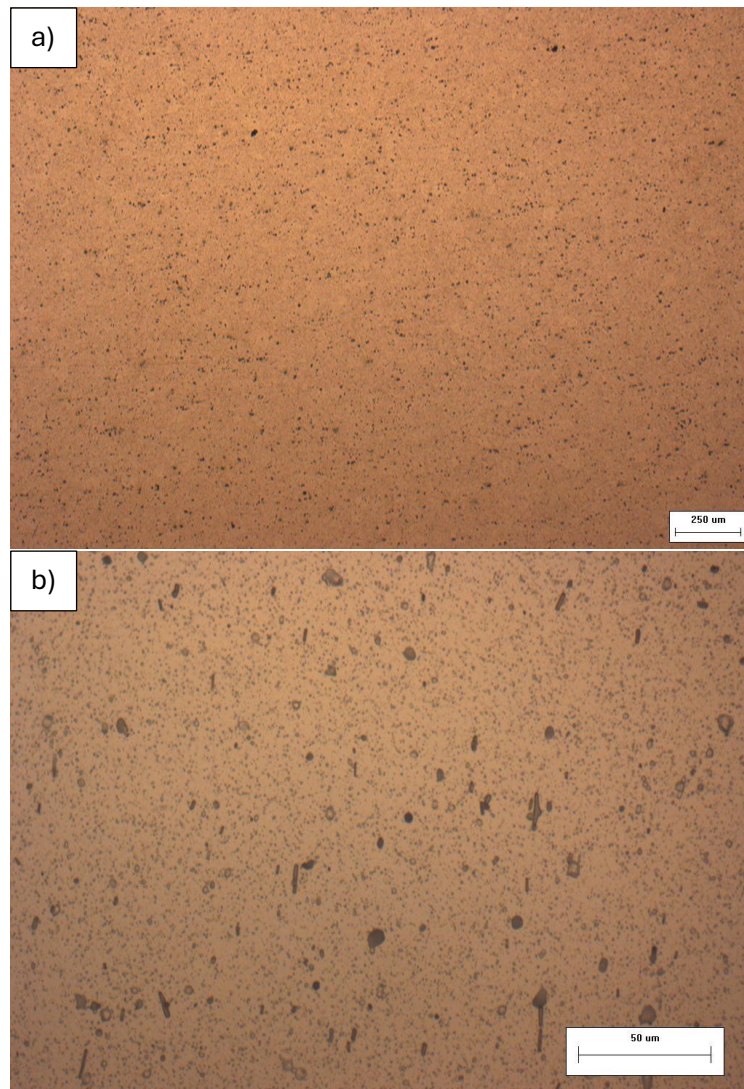


Figura 3.1. Micrografías de la lámina de aluminio en estado inicial en dirección normal a la dirección de laminación con diferentes aumentos.

La Figura 3.2 obtenida por medio del microscopio electrónico de barrido muestra la microestructura de la aleación, en donde se pueden ver los límites de grano, así como precipitados (en contraste oscuro) y dispersoides (en contraste claro) en la matriz, distribuidos en la matriz con distintas geometrías, principalmente rectangular. En la Figura 3.3, se muestra en mayor detalle los precipitados que presentan una morfología en forma de plaquetas, morfología característica de la fase estable β (Mg_2Si) [11], correspondiente a un estado de sobre envejecimiento [10], condición en la que la aleación es expuesta a un mayor tiempo de tratamiento térmico, provocando el engrosamiento de los precipitados.

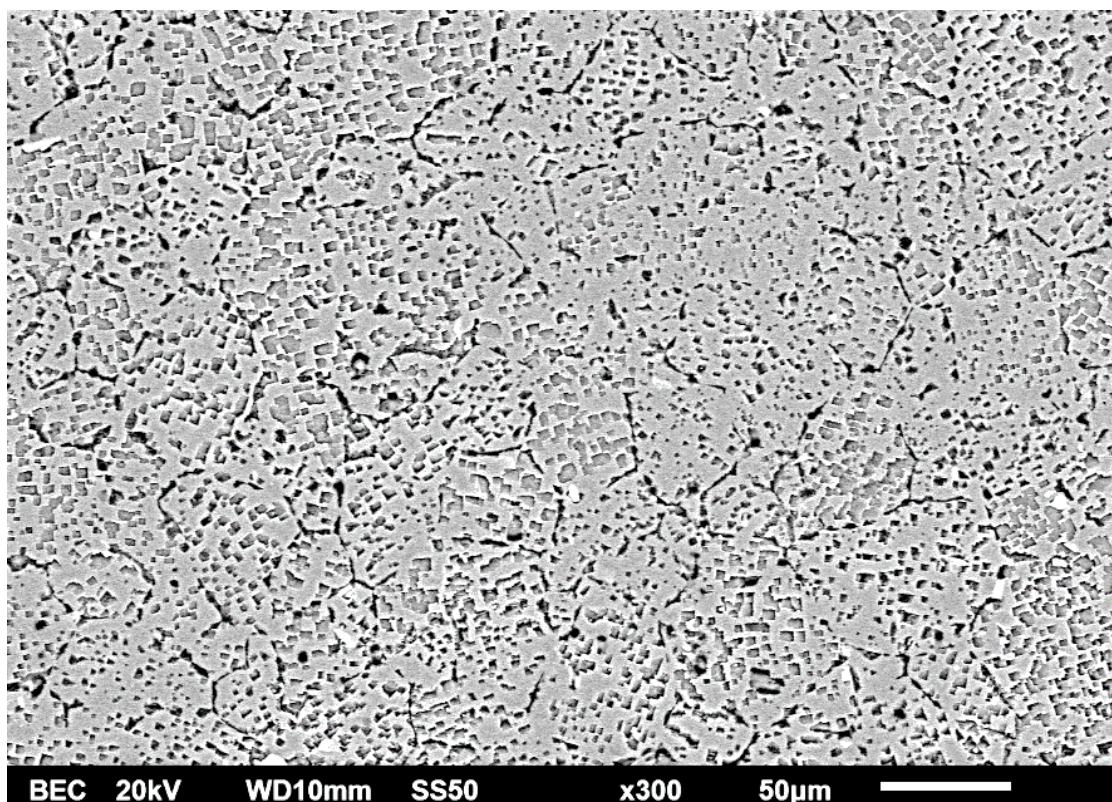


Figura 3.2. Microestructura de la aleación AA6082-T6 imagen obtenida por MEB.

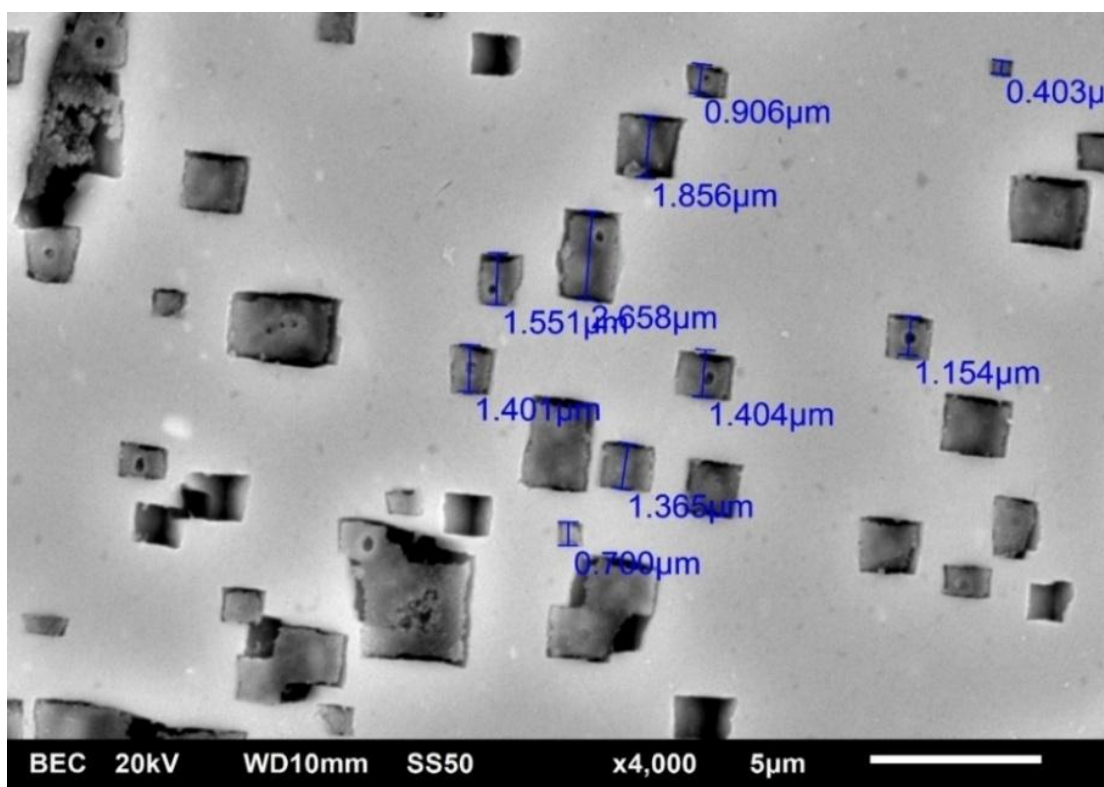


Figura 3.3. Tamaño y morfología de los precipitados y partículas intermetálicas en la matriz de la aleación.

Es posible notar los diversos tamaños que tienen los precipitados, desde 0.4 hasta 1.8 micras, teniendo un tamaño promedio de 1.2 micras.

Por medio de la técnica de espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), se analizó la composición química de forma cualitativa de las diversas zonas observadas. La Figura 3.4 muestra la zona en donde fue realizado el análisis EDS de la matriz, la cual exhibió pequeñas cantidades de Mg, Si y Fe con aproximadamente 0.37, 1.69 y 0.58 % en peso, respectivamente y 97.36% de aluminio.

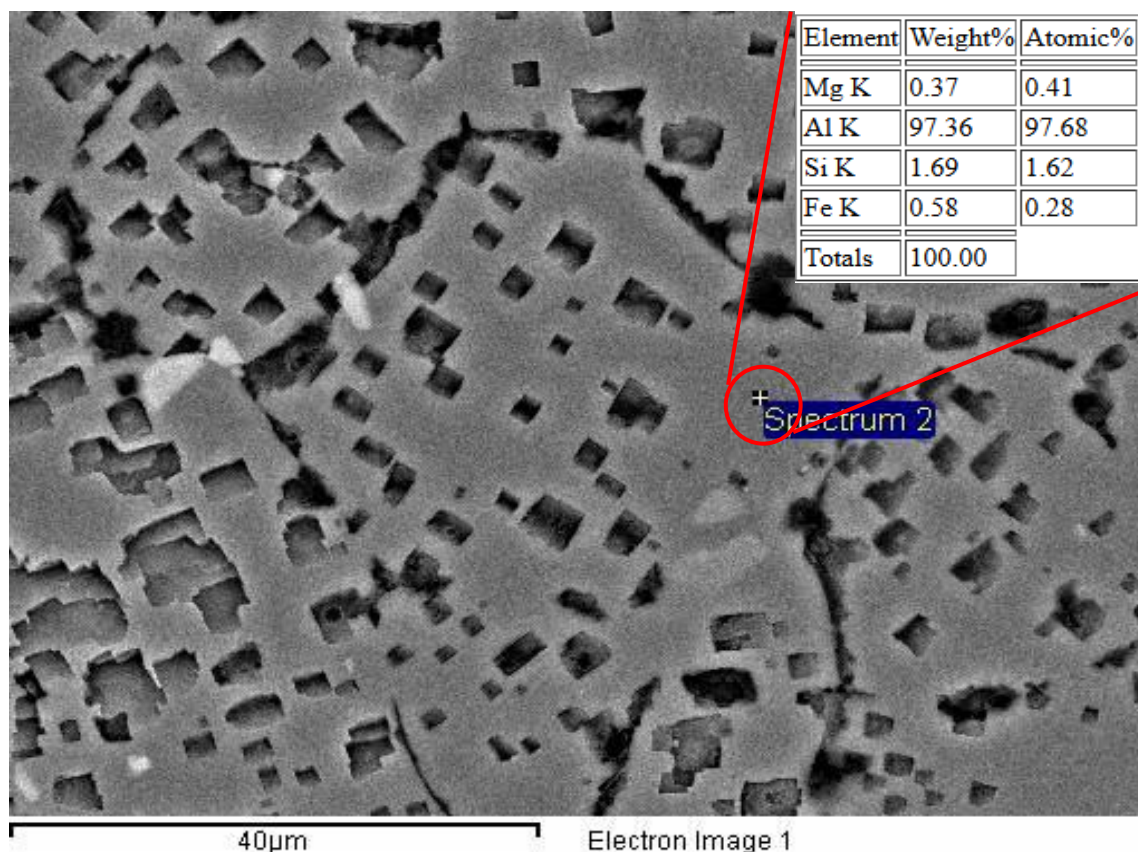


Figura 3.4. Zona de análisis y resultados de EDS para la matriz de la aleación.

Se visualizan dos tipos de precipitados, uno en contraste blanco con una forma más irregular y otro con contraste oscuro en forma de placas. El análisis del precipitado blanco es mostrado en la Figura 3.5, este presenta una composición de 17.13 y 24.61% en peso de Si y Fe, respectivamente, debido a estos porcentajes es posible relacionarlo con la estequiometría de la fase $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$. La Figura 3.6 muestra la zona donde fue realizado el análisis para el precipitado oscuro, con una composición de 0.31 y 1.21 % en peso de Mg y Si, respectivamente, que se estima es la fase Mg_2Si .

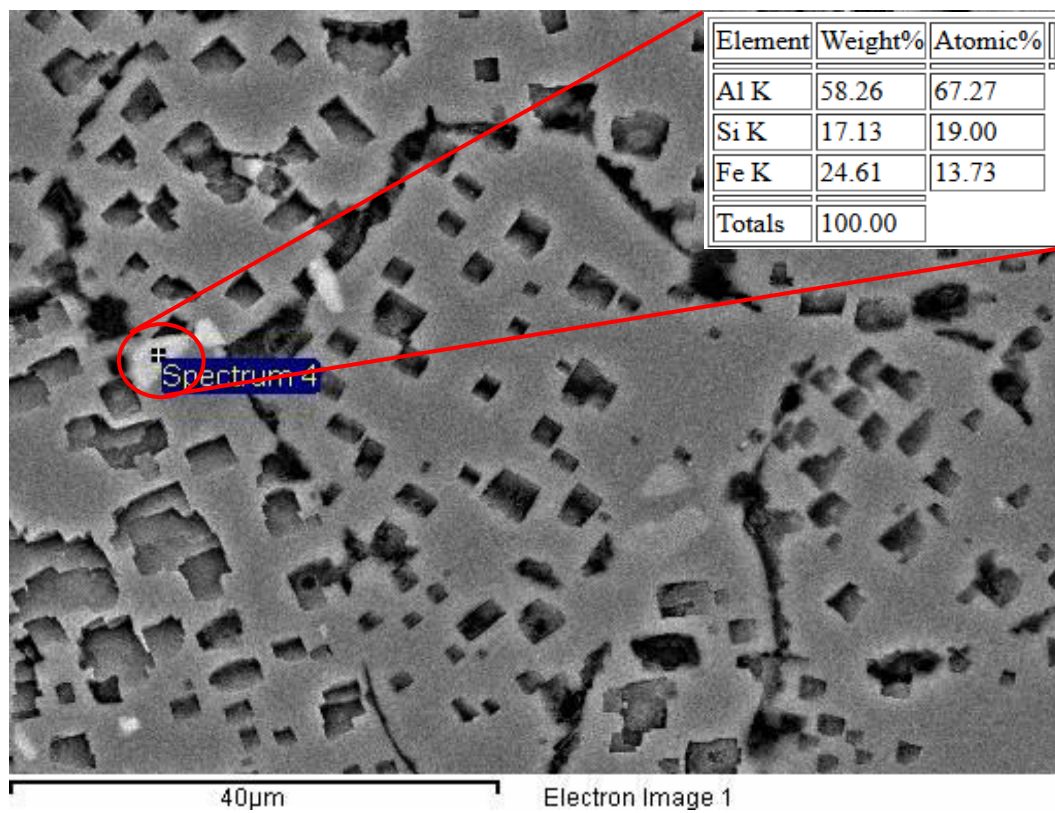


Figura 3.5. Zona de análisis y resultados de EDS para el precipitado blanco.

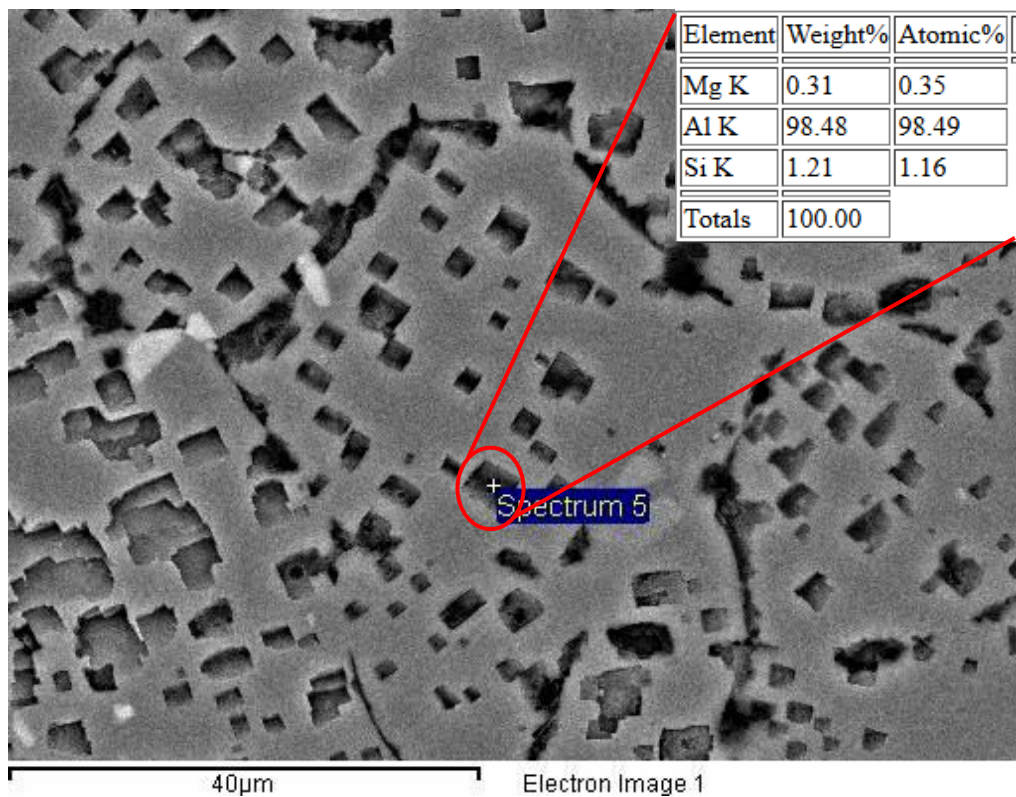


Figura 3.6. Zona de análisis y resultados de EDS para el precipitado oscuro.

Del análisis del volumen de interacción obtenido por la ecuación de Kanaya-Okayama, se encontraron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 3.1. Se puede notar que el tamaño del volumen de interacción de todas las fases presentes sobrepasa el tamaño promedio de los precipitados analizados, que es de 1.2 micras, por lo que se detectan señales de otras fases y/o elementos que impiden el correcto análisis de los precipitados por esta técnica, lo que indicaría no exista una relación estequiométrica de acuerdo con las fases esperadas.

Tabla 3.1. Volumen de interacción de las posibles fases observadas por análisis EDS.

Fase.	Volumen de interacción calculado (micras).
Matriz de la aleación.	4.211
Al ₃ Fe ₂ Si	2.71
Mg ₂ Si	5.68

El tamaño y morfología de los precipitados, puede estar asociado a un sobre envejecimiento provocado por un tiempo prolongado de tratamiento térmico o una mayor temperatura. Yang et. al. [12] evaluaron diferentes temperaturas a las que se realiza el tratamiento térmico T6 en AA6082, en donde se concluyó que, debido al aumento de la temperatura del tratamiento, ocurre un engrosamiento en los precipitados de la aleación arriba de los 200°C. Mientras que Li et. al. [48] determinaron las velocidades de engrosamiento de los precipitados de la misma aleación. En un intervalo de temperaturas de 100-150°C, la aleación presenta una excelente estabilidad térmica, mostrando valores mayores de resistencia. Sin embargo, si es expuesta a temperaturas mayores a 150°C por periodos de tiempo prolongados, cercanos a 1000 h, la resistencia decrece significativamente. Esto es debido al engrosamiento de los precipitados, que crecen por la exposición a altas temperaturas o largos periodos de tiempo [48]. Los resultados de este trabajo podrían estar relacionados a un estado de tratamiento térmico de sobre envejecimiento, lo que indica la forma y tamaño de los precipitados.

La Figura 3.7 muestra los valores de microdureza Vickers contra las diferentes temperaturas en las que es llevado a cabo el envejecimiento artificial por 1 hora en AA6082 [12]. La mayor dureza es de 115 HV y es encontrada a una temperatura de tratamiento térmico de 200°C, mientras que a 300°C presenta un sobre envejecimiento

con 60 HV. En el presente trabajo, la dureza encontrada fue de 75 HV, lo que corresponde a una temperatura mayor a aquella en la cual la aleación presenta su máximo valor de dureza, lo cual ocurre a 200°C, esto puede indicar que a la aleación se trató térmicamente a 250°C aproximadamente o por un mayor periodo de tiempo.

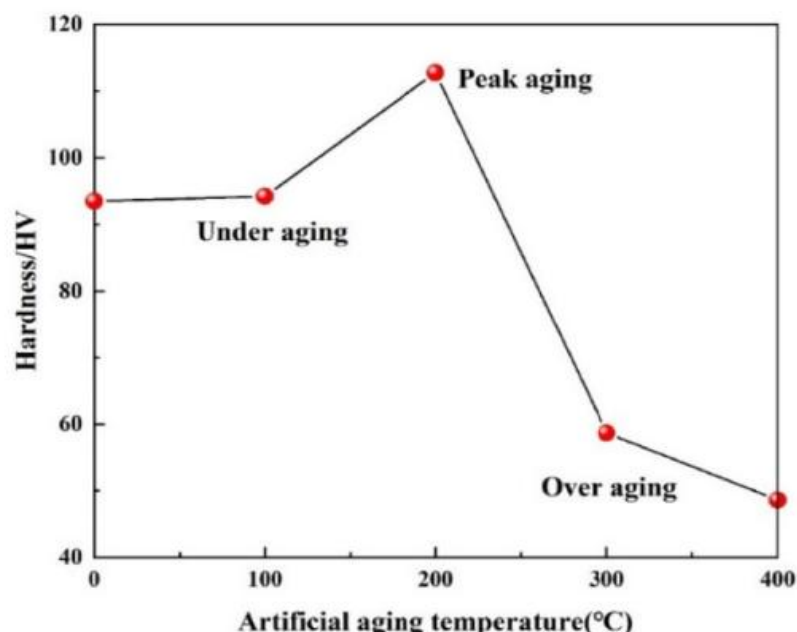


Figura 3.7. Dureza a diferentes temperaturas de envejecimiento por 1 hora para la AA6082-T6 [12].

3.2. Difracción de rayos X.

El difractograma del análisis de Rayos X se muestra en la Figura 3.8. Se utilizó el *Software Diffrac Eva* versión 5.2 para la identificación de las fases. Las principales señales pertenecen a la fase α , correspondiente al elemento aluminio, además de registrar pequeñas señales de otras fases con contenido de aluminio, magnesio, silicio y hierro.

Debido a la poca cantidad de las fases observadas mediante difracción de Rayos X, se realizó un refinamiento del difractograma en el programa MAUD. Se comparó el resultado con las cartas de identificación 00-070-0058 y 05-001-0628 de la base de datos del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD), PDF-2 Release 2022 [49], correspondientes a las fases Mg_2Si y Al_3Fe_2Si , respectivamente. En el ángulo de difracción 40.22° , se puede distinguir la familia de planos con mayor intensidad registrada para la fase Mg_2Si que es posible visualizar en la Figura 3.9.

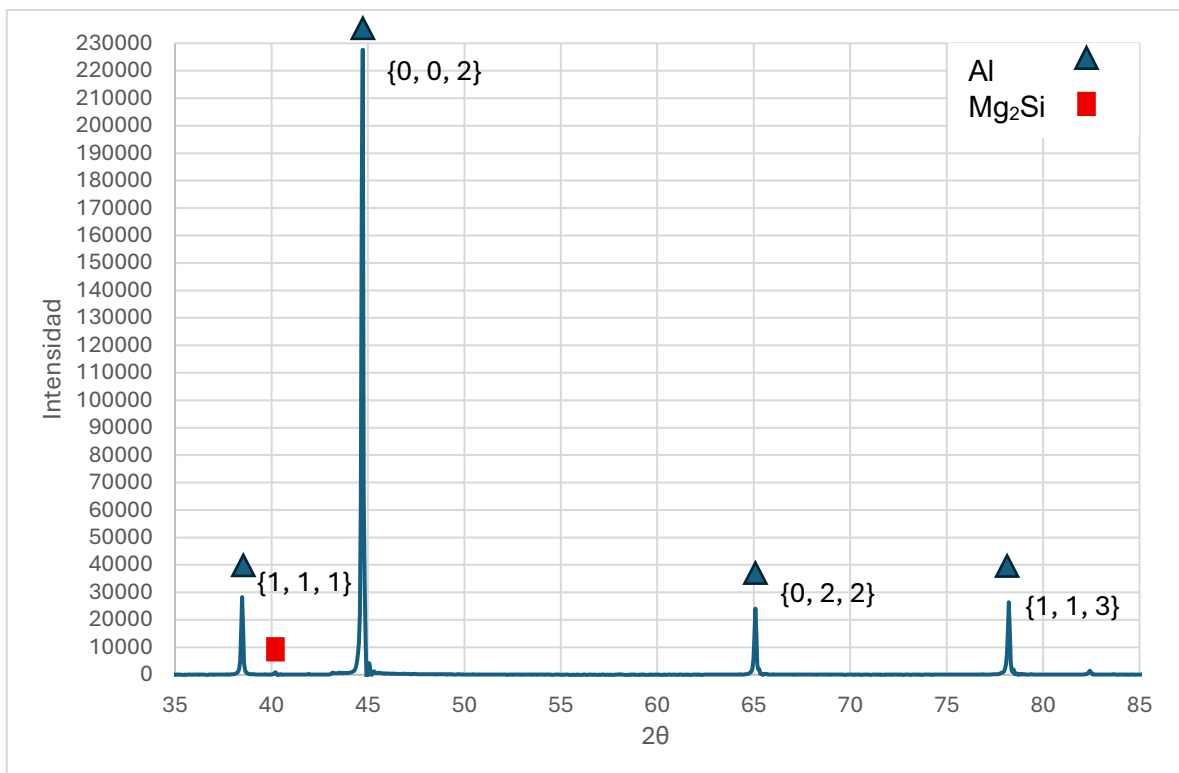


Figura 3.8. Difractograma de AA6082-T6.

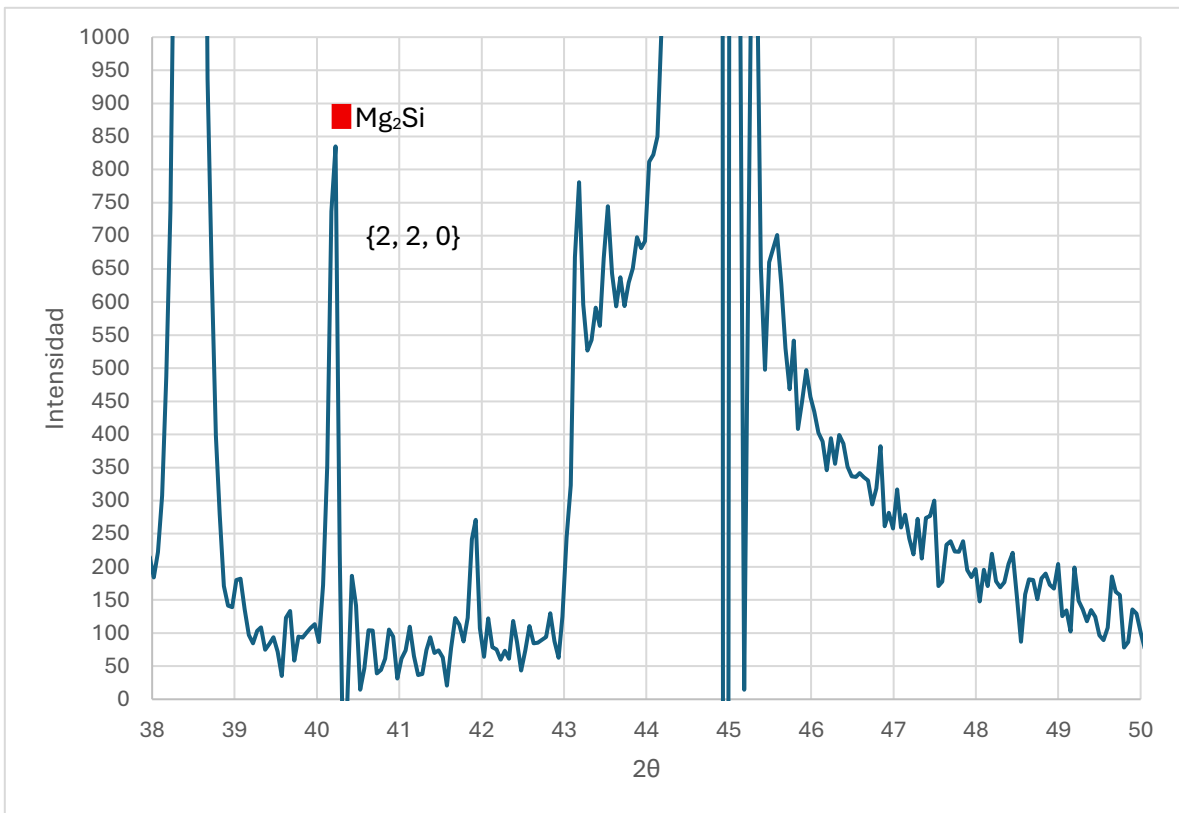


Figura 3.9. Intensidad de la fase Mg₂Si.

La estequiometría de la fase $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ es muy similar al precipitado observado en MEB en tono claro, Figura 3.5, con una composición de 58.26, 17.13 y 24.61% en peso de Al, Si y Fe, respectivamente, sin embargo, en el análisis del difractograma no se identifican las intensidades para la fase $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$, por lo que no es resoluble en esta técnica. Por otro lado, la fase Mg_2Si difiere en estequiometría con la composición encontrada en el análisis por EDS para el precipitado oscuro, Figura 3.6, sin embargo, esta fase sí muestra algunas intensidades en el difractograma, por lo que se infiere que sí es identificada en la prueba de difracción de Rayos X.

3.3. Propiedades a la tensión.

La curva de esfuerzo real contra deformación real que se obtuvo de los ensayos de tensión se muestra en la Figura 3.10, de donde se tomaron los valores de las propiedades mecánicas para cargarlos al programa *DEFORM-3D*. Los valores de cedencia, UTS y elongación de la aleación encontrados en el ensayo se muestran en la Tabla 3.2.

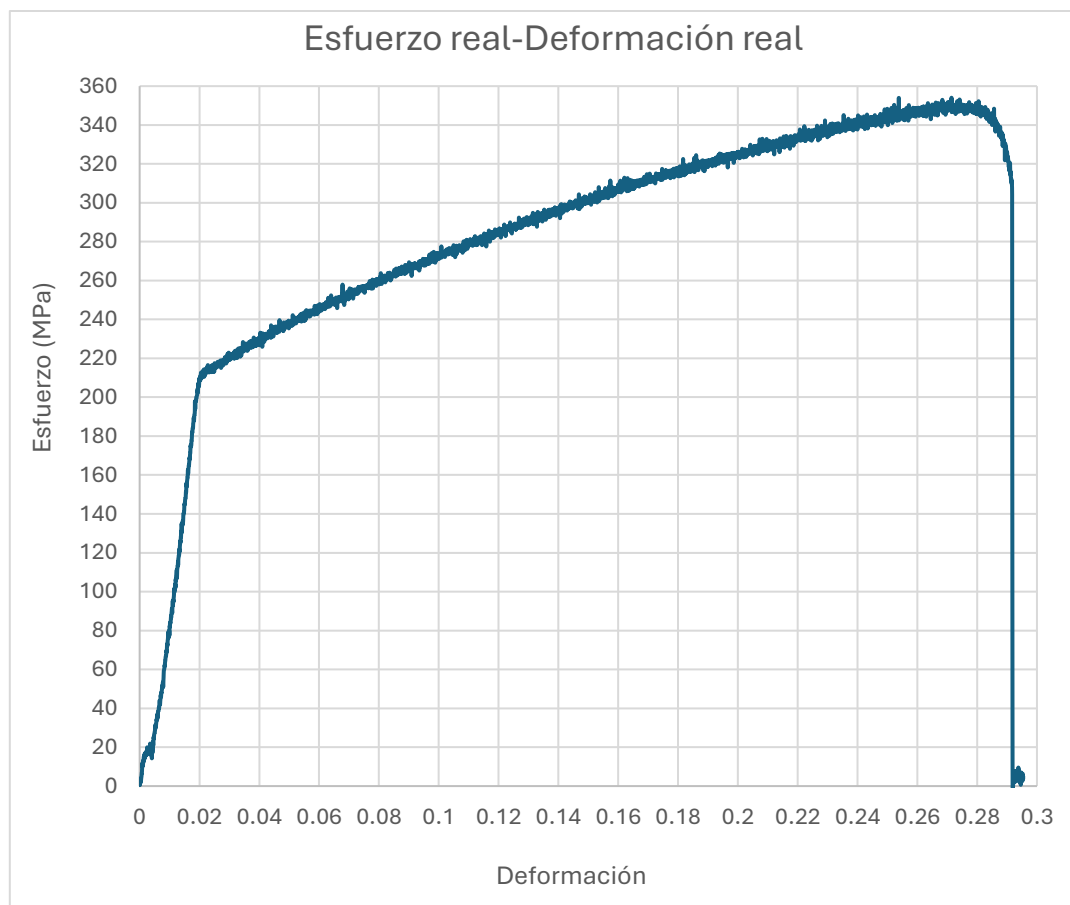


Figura 3.10. Curva Esfuerzo real- Deformación real de AA6082- T6.

Tabla 3.2. Propiedades obtenidas del ensayo de tensión de AA6082-T6.

Cedencia, MPa.	210
UTS, MPa.	350
Elongación.	27 %
Dureza.	75 HV

3.4. Diseño del herramental y optimización del tamaño máximo de blanco, así como la posición y altura de la ranura de sujeción.

Las piezas diseñadas en el programa *SolidWorks*®, y utilizadas en la simulación, se muestran en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12, las cuales son denominadas sujetador, punzón y dado superior respectivamente. El sujetador y dado superior estuvieron cambiando su diseño debido a que en estas piezas se encuentra la ranura, por lo que se muestra el diseño final de las herramientas. Para la simulación únicamente fue necesario colocar estas tres piezas y no todo el herramental, porque son las piezas que tienen contacto directo con la lámina y provocan la deformación. Las otras piezas pueden ser consideradas como piezas de la estructura del troquel.

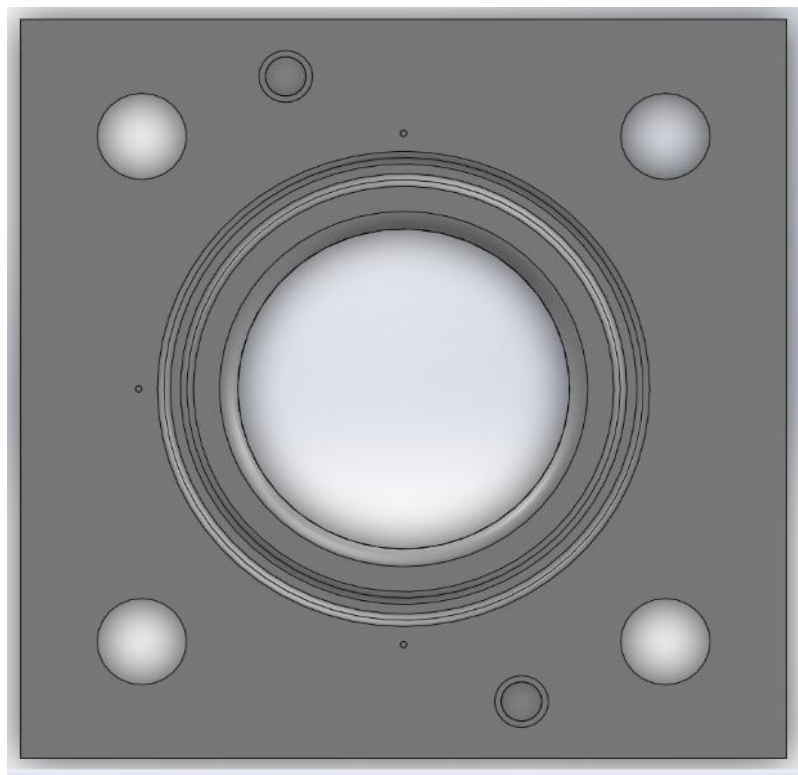


Figura 3.11. Sujetador.



Figura 3.12. Punzón.

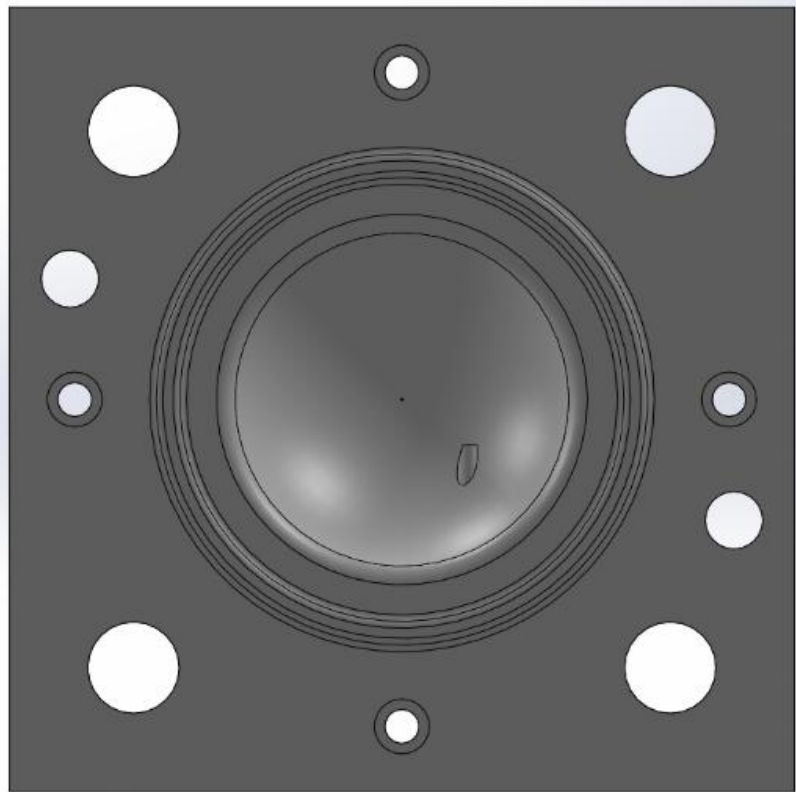


Figura 3.13. Dado superior.

3.4.1. Efecto de la altura de ranura en la operación de sujeción.

Los resultados de las simulaciones al variar la altura de ranura se muestran en la Tabla 3.3. Al reducir este parámetro, disminuye la fuerza necesaria para la sujeción. La altura de 0.8 mm requirió menor carga, 18.7 Ton y presentó un levantamiento de 0.68 mm, mientras que las demás alturas superaron 1 mm en el efecto de levantamiento y presentan cargas mayores a 40 Ton. El área de contacto también se redujo con menores alturas. Para las siguientes simulaciones se seleccionó 0.8 mm de altura de ranura, ya que, el objetivo era minimizar la carga en el proceso de sujeción.

Tabla 3.3. Resultados de la simulación variando la altura de ranura. Posición de ranura de 63.2 mm y un blanco de 82x82 mm.

Altura de ranura (mm).	Fuerza (Ton).	Levantamiento (mm).	Área de contacto con herramental (mm ²).
2.35	50	1.34	5850
1.575	45.5	1.08	4530.3
0.08	18.7	0.68	2494.8

La Figura 3.14 muestra el herramental después del proceso de sujeción, en donde el dado ya bajó y está sujetando el blanco junto con el sujetador. Los dados son observados en color gris claro, ya que el programa permite transparentar las piezas y observar la pieza de trabajo. En color amarillo se muestra el blanco, en donde es posible notar, en la circunferencia marcada, que la ranura fue hecha y se encuentra sujetado por ambas piezas.

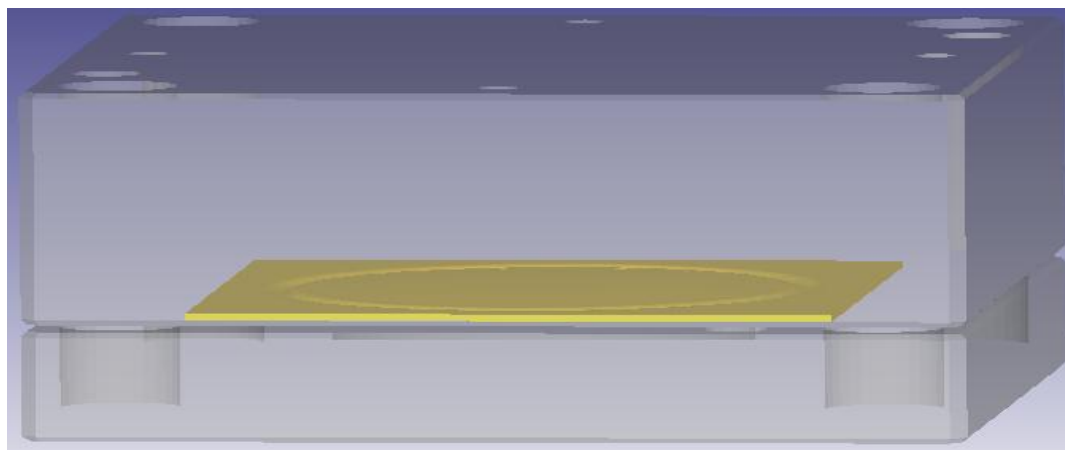


Figura 3.14. Herramental después del proceso de sujeción para el blanco de 82x82.

La Figura 3.14 muestra un corte transversal del herramental después del proceso de sujeción de la lámina, donde se observa en el círculo rojo, la zona en que queda sujetado el blanco en la ranura fabricada entre el sujetador y el dado superior. El efecto de levantamiento encontrado en las muestras durante la sujeción se muestra en la Figura 3.15, donde a través de un corte transversal del ensamble de herramientas se observa que la lámina se levanta de la parte central.

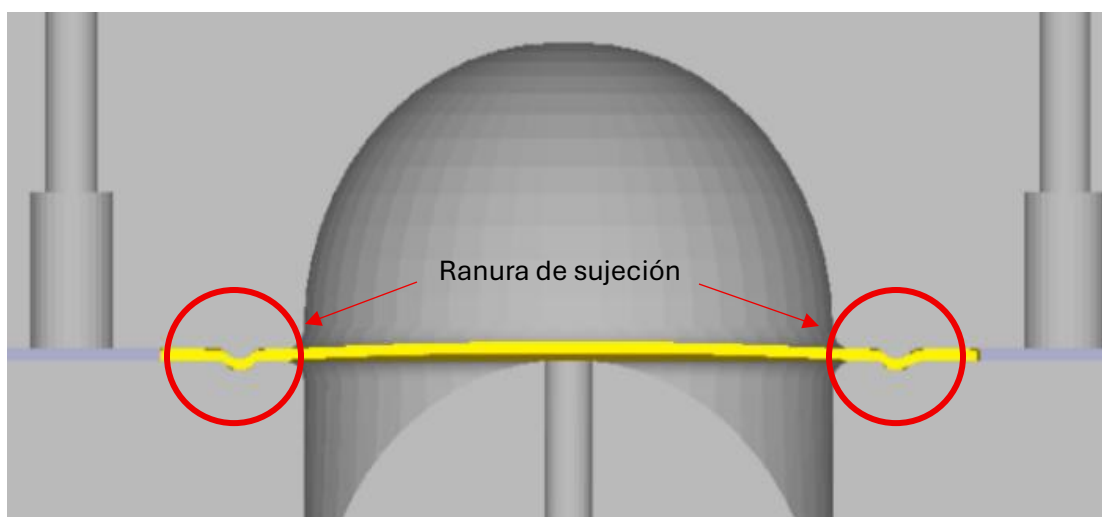


Figura 3.15. Corte transversal de la matriz después del proceso de sujeción.

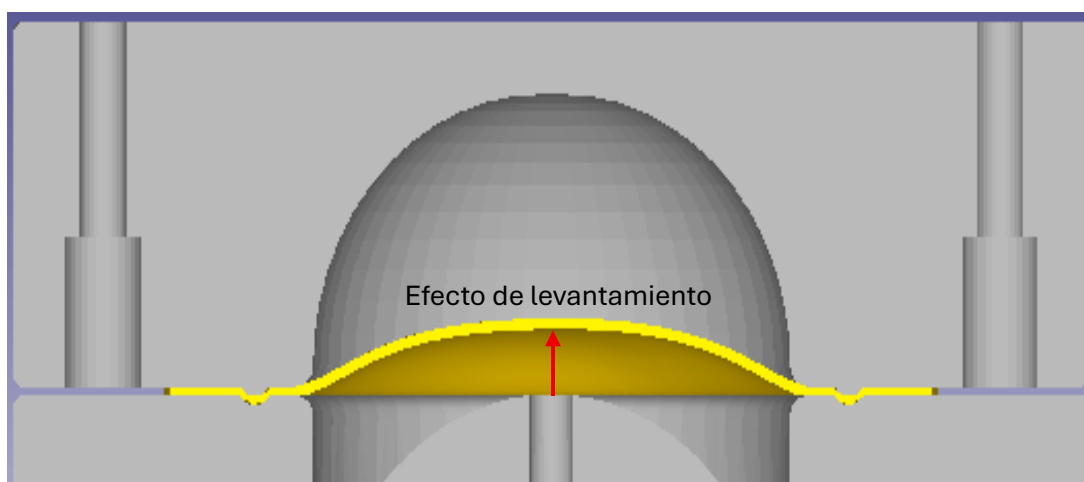


Figura 3.16. Efecto de levantamiento sobre la parte central de la lámina durante la sujeción.

3.4.2. Efecto del tamaño de blanco en la sujeción.

Los resultados de las simulaciones con una posición de la ranura en 63.2 mm, (determinada así porque es la mínima posición que permite la fabricación adecuada del radio de entrada al dado superior), para distintos tamaños de blancos y usando una altura de ranura de 0.8 mm, se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados de las simulaciones realizadas variando el tamaño de blanco. Altura de sujetador de 0.8 mm y una posición de la ranura de 63.2 mm.

Blanco (mm).	Fuerza (Ton).	Levantamiento (mm).	Área de contacto (mm²).
70x70	19.4	0.7	2019.4
74x74	19.9	0.72	2102.5
78x78	18.8	0.73	2223.3
82x82	18.7	0.68	2494.8

Este grupo de simulaciones se llevó a cabo, debido a que era necesario determinar el tamaño más grande de geometría cuadrada, que pudiera acomodarse en las herramientas, para a partir de este valor, determinar los otros valores del ancho que la prueba de Nakazima requería. La menor fuerza obtenida fue con el blanco de ancho de 82 mm con 18.7 Ton, mientras que la mayor fuerza se obtuvo con el blanco de 74 mm de ancho con 19.9 Ton. La Figura 3.17 muestra la geometría de la lámina después del proceso de sujeción.

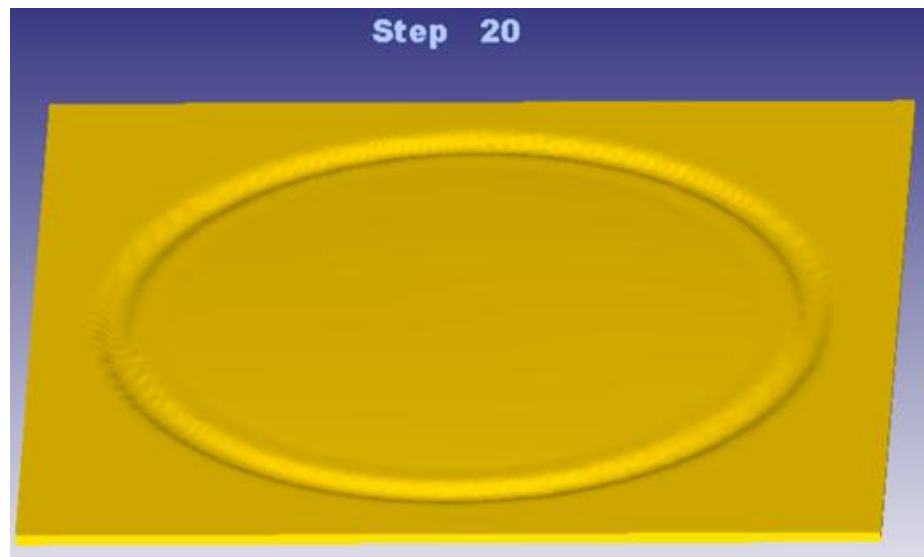


Figura 3.17. Blanco 82x82 mm después del proceso de sujeción.

3.4.3. Efecto de la posición de la ranura en la sujeción.

En las simulaciones se consideraron tres posiciones de ranura mayores a la mínima de 63.2 mm, fijando una altura de ranura de 0.8 mm y un tamaño de blanco de 82x82 mm.

Se obtuvieron los valores de fuerza, levantamiento y área de contacto con el herramental mostrados en la Tabla 3.5. Se encontró que, al aumentar el valor de la posición de ranura, aumenta la carga necesaria para la sujeción y se reduce el efecto de levantamiento. La posición de ranura de 63.2 mm presentó una carga de 19.1 Ton siendo el valor más bajo de carga, sin embargo, muestra un valor mayor de efecto de levantamiento con 0.77 mm. La mayor fuerza se obtuvo para la ranura con posición de 74 mm con 26.2 Ton y un levantamiento de 0.212 mm, siendo el menor valor registrado en dicho efecto. La fuerza registrada para la ranura de 68.5 mm fue de 25.3 Ton y un levantamiento de 0.38 mm.

Tabla 3.5. Resultados de la simulación para el proceso de sujeción variando posición de ranura.

Altura de 0.8 mm y blanco de 82x82 mm.

Posición de ranura (mm).	Fuerza (Ton).	Levantamiento (mm).	Área de contacto con herramental (mm²).
63.2	19.1	0.77	2321
68.5	25.3	0.38	4336
72	25.5	0.28	3997
74	26.2	0.212	4082.7

Determinado el tamaño máximo de blanco que minimiza la carga y, además, con la posición de ranura de 68.5 mm que facilita el maquinado del herramental, se realizó el siguiente grupo de simulaciones en las cuales se varió el ancho de los blancos que la prueba de Nakazima requería.

3. 5. Simulación del proceso de sujeción.

Los datos de carga necesaria para el proceso de sujeción de cada blanco y el valor del efecto de levantamiento generado en la lámina se presentan en la Tabla 3.6. Para el efecto de levantamiento, se obtiene un máximo para el blanco de 10 mm con una altura de 0.6 mm, y para el blanco de 58 mm de ancho se obtiene un levantamiento de 0.124 mm, siendo el blanco que presenta este efecto en menor grado. Es importante mencionar que, en todos los tamaños de blanco, el levantamiento es menor a 1 mm, siendo reducido este efecto al mínimo. En los resultados relativos a la carga, se observó que mientras se reduce el ancho del blanco también hay un decremento en la carga.

Tabla 3.6. Carga y levantamiento de la lámina después del proceso de sujeción.

Ancho blanco (mm).	Fuerza (Ton).	Levantamiento (mm).	Área de contacto con herramental (mm ²).
82	25.3	0.38	4336
70	24	0.44	3378.47
58	16.5	0.12	2206.4
46	13.1	0.16	1434.3
34	8.7	0.15	1060
22	5.8	0.24	632
10	3.9	0.60	298

La Figura 3.18 muestra la carga durante el recorrido del dado en el proceso de sujeción. Para el blanco de 82x82 se registra un máximo de 25.3 Ton y una carga mínima de 3.9 Ton para el blanco de 10 mm de ancho. En ambas curvas se observa un comportamiento similar, ocurre un aumento en la fuerza de manera lineal mientras se lleva a cabo la sujeción.

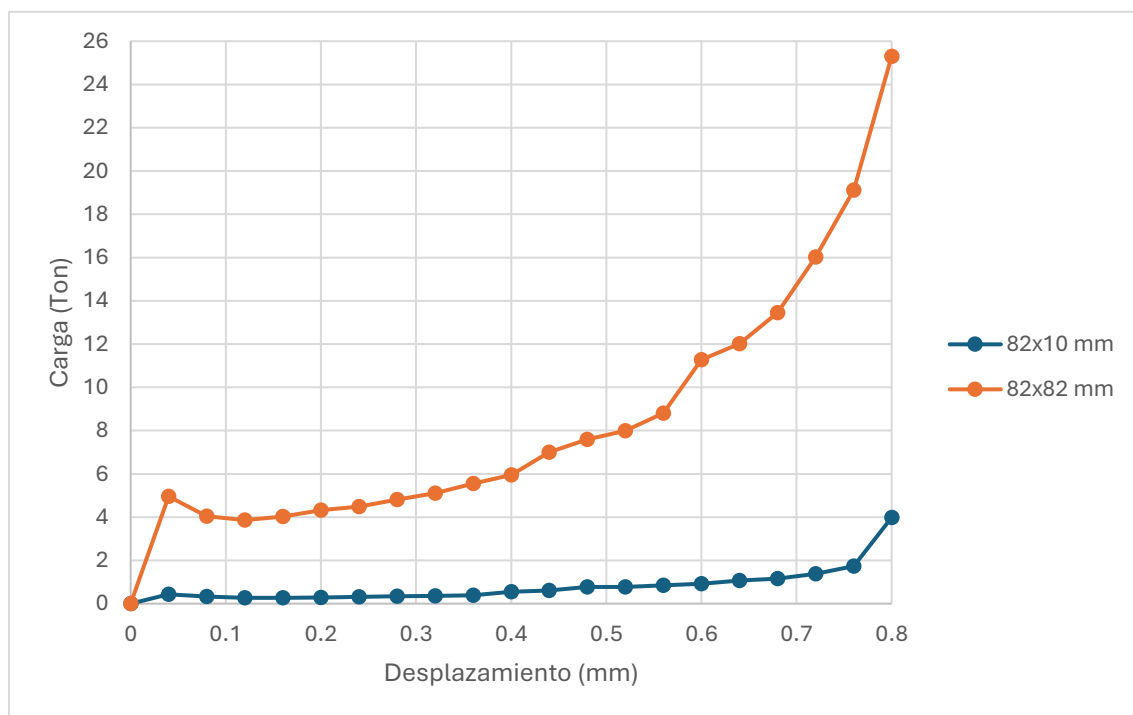


Figura 3.18. Carga generada durante el proceso de sujeción del blanco 82x82 y 82x10 mm.

3.6. Simulación de la prueba de Nakazima y construcción del Diagrama Límite de Formado.

Como resultado del grupo de simulaciones de la prueba de Nakazima en los 7 blancos con distinto ancho, fue posible obtener las curvas de desplazamiento del punzón contra la carga necesaria de la prueba. La Figura 3.19 muestra los gráficos del desplazamiento del punzón contra la carga para los 7 tamaños de blanco utilizados. Todas las curvas mostradas en dicha figura tienen un comportamiento similar en donde aumenta la carga de manera lineal, mientras se va desplazando el punzón, hasta llegar a un punto máximo, en donde ésta se reduce abruptamente con respecto al desplazamiento, y después se mantiene constante. Se observó que a medida que el tamaño del blanco es menor, los valores de la fuerza disminuyen.

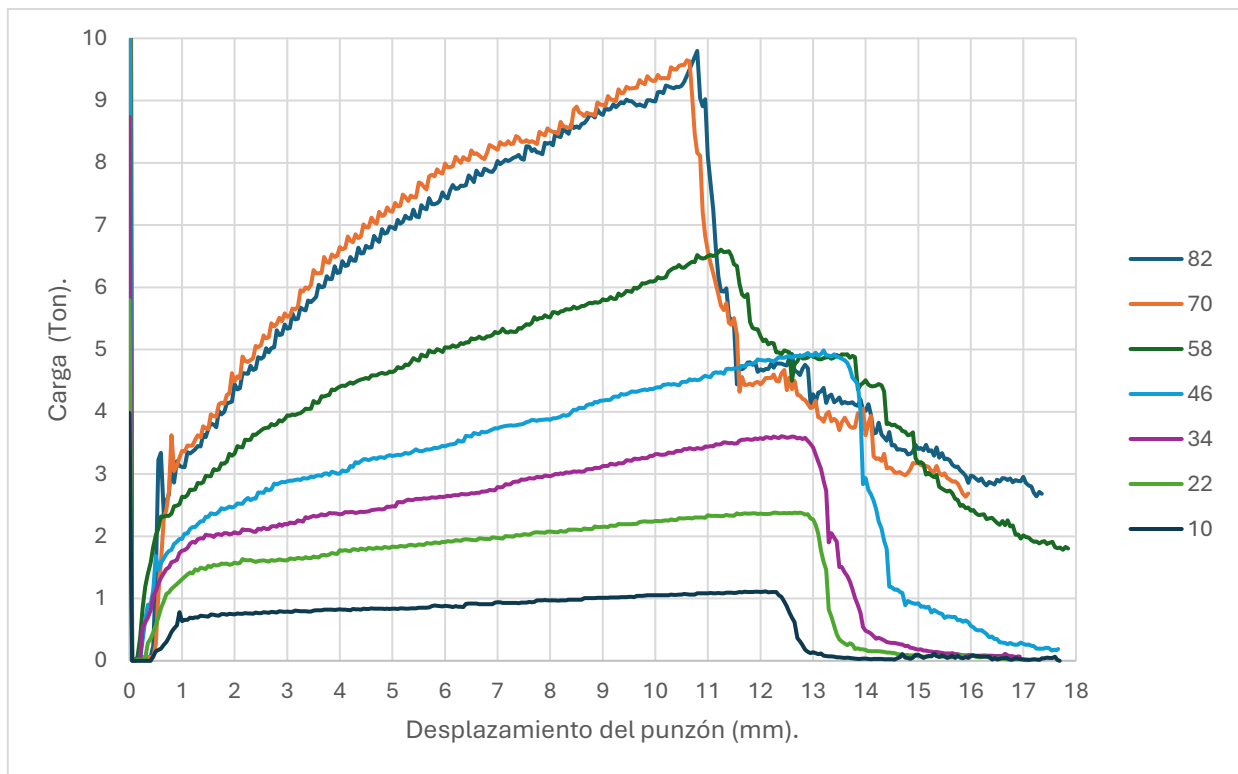


Figura 3.19. Carga contra desplazamiento para todos los blancos.

La Tabla 3.7 muestra los valores de carga y desplazamiento total del punzón para cada blanco. La mayor fuerza registrada es de 9.8 Ton para el blanco de 82x82 mm, mientras que el blanco de 82x10 mm únicamente registró 1.1 Ton. El mayor desplazamiento se obtuvo para el blanco de 82x58 y 82x46 mm, con un avance de punzón de 17.7 mm en

cada uno de ellos. Por otro lado, el menor desplazamiento se registró para el blanco de 82x70, con un desplazamiento de 15.8 mm.

Tabla 3.7. Valores de fuerza máxima y desplazamiento alcanzados para cada blanco durante la simulación de la prueba de Nakazima.

Ancho de blanco (mm).	Fuerza (Ton).	Desplazamiento (mm).
82	9.8	17.4
70	9.56	15.8
58	6.58	17.7
46	4.82	17.7
34	3.6	17
22	2.37	17.1
10	1.1	16.3

La Figura 3.20 muestra uno de los pasos intermedios de la simulación, en donde se observa el desplazamiento del punzón y la deformación de la lámina, además muestra el apex que es la parte central del blanco con mayor altura después de la prueba.

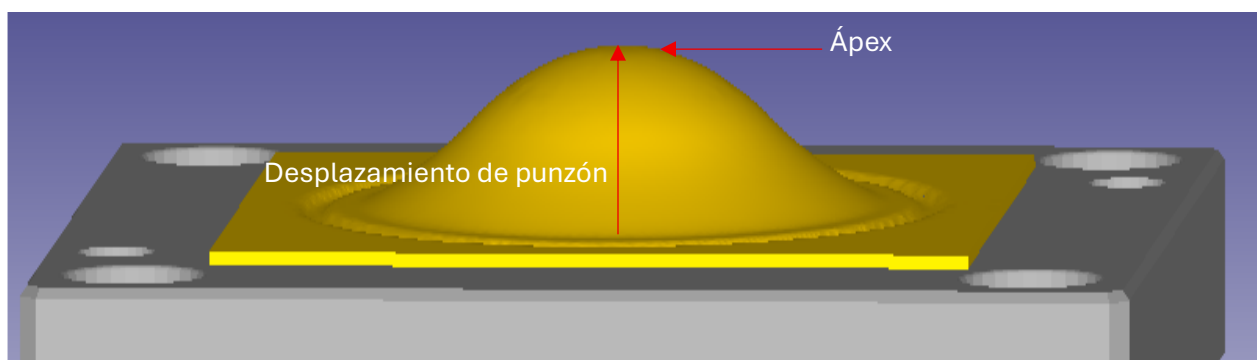


Figura 3.20. Desplazamiento del punzón que produce la deformación de la lámina para el blanco de 82x82 mm.

Safdarian et al. [50], realizaron la predicción de un FLD para AA6061 mediante la prueba de Nakazima, en la cual se obtuvo un comportamiento similar de carga contra desplazamiento al obtenido en este trabajo, Figura 3.21. En dicha figura se visualiza como la carga aumenta mientras se va desplazando el herramental, alcanzando un máximo para después experimentar una caída, una vez que la lámina sufre un adelgazamiento.

También realizan la prueba de forma experimental, midiendo la carga necesaria para el proceso, obteniendo resultados similares en ambas curvas.

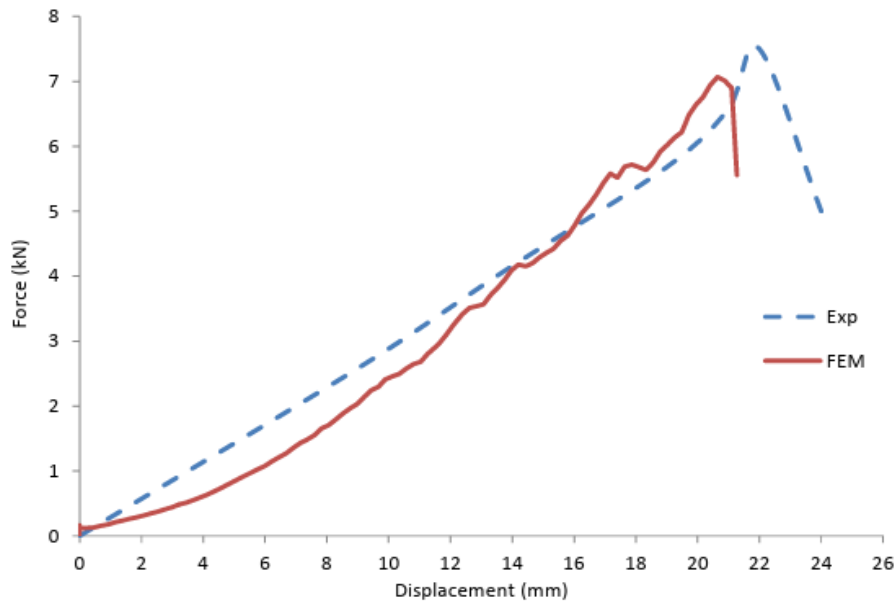
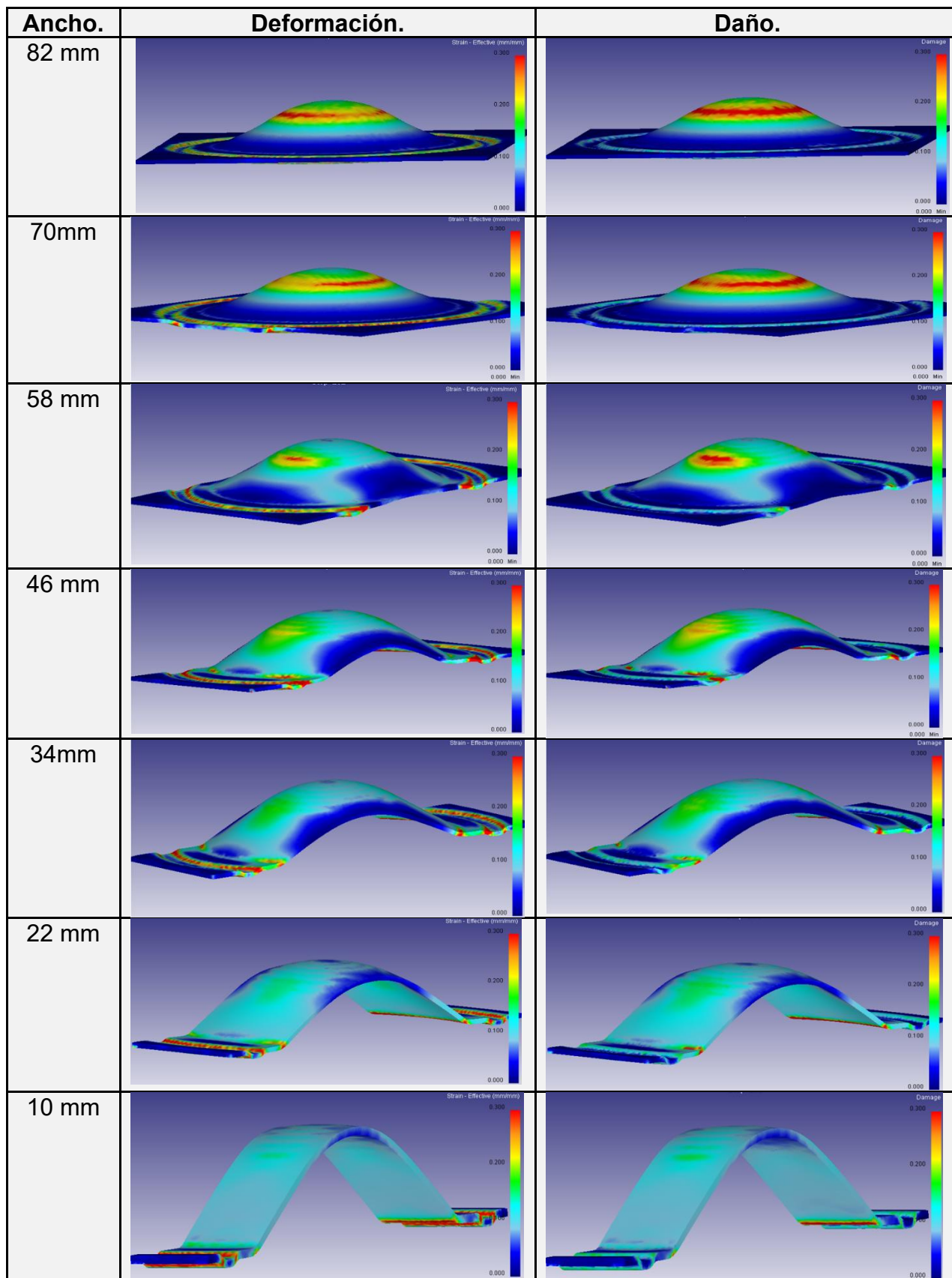


Figura 3.21. Comparación de la gráfica de fuerza contra desplazamiento durante la prueba de Nakazima para AA6061 [50].

Por otro lado, en esta investigación, se obtuvieron mapas de contorno para visualizar las regiones en las que se predicen mayores valores de deformación y daño, para cada tamaño de blanco, los cuales se presentan en la Tabla 3.8. En éstos, se puede observar que, para los tamaños de blanco de 82x82, 82x70 y 82x58 y 82x46 mm existe una mayor deformación y un mayor daño en la zona del radio del punzón, es en esta región donde el programa predice la aparición de la fractura (visualizado en zonas de color rojo), cercanas al apex. Por otro lado, para los blancos más pequeños, de ancho 34, 22 y 10 mm, se registra una deformación y daños mayores en la zona cercana a la ranura de sujeción, donde se predice la fractura de la lámina en estos blancos.

Tabla 3.8. Deformación y daño registradas para cada blanco después de la simulación.



Estudios previos sobre la simulación de la prueba de Nakazima [51] han predicho la fractura en AA2021. En la Figura 3.22 se observan distintos estados de deformación en función del coeficiente de fricción, obteniéndose zonas de fractura cercanas al radio o ápex del punzón, resultados consistentes con los de este trabajo, que es evaluado con un coeficiente de fricción de 0.12.

De manera similar, Habeeb AH et al. [52] identificaron posibles zonas de fractura en regiones similares mediante un análisis numérico del coeficiente de fricción en la prueba de Nakazima. Estos autores simularon el ensayo para una aleación de aluminio 1060 de 1 mm de espesor, validando sus resultados experimentalmente. Al variar el coeficiente de fricción, encontraron que, a mayor fricción, la formabilidad disminuye y la grieta tiende a formarse lejos del centro de la muestra. Su estudio determinó que un coeficiente óptimo para la prueba se encuentra entre 0.1 y 0.15 (Figura 3.23), intervalo en el que se sitúa el valor de 0.12 empleado en este trabajo. Ambos estudios coinciden en que, a menor coeficiente de fricción, la zona de fractura predicha se desplaza hacia la punta del punzón.

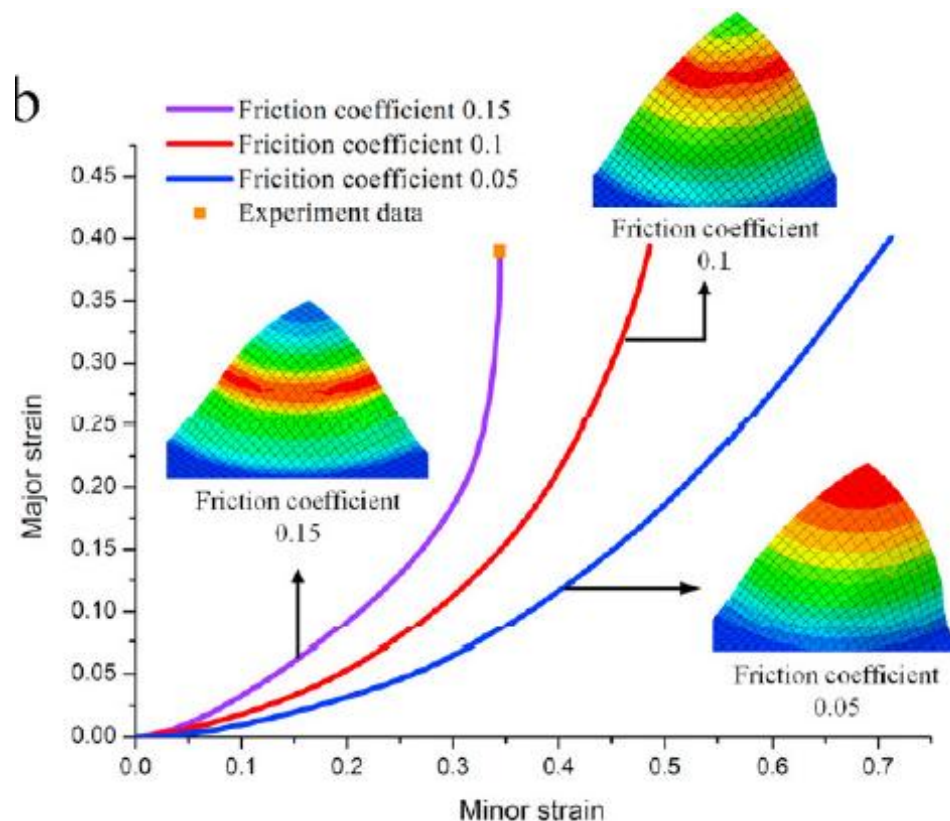


Figura 3.22. Estados de deformación y zonas de fractura con diferentes coeficientes de fricción para AA2021 [51].

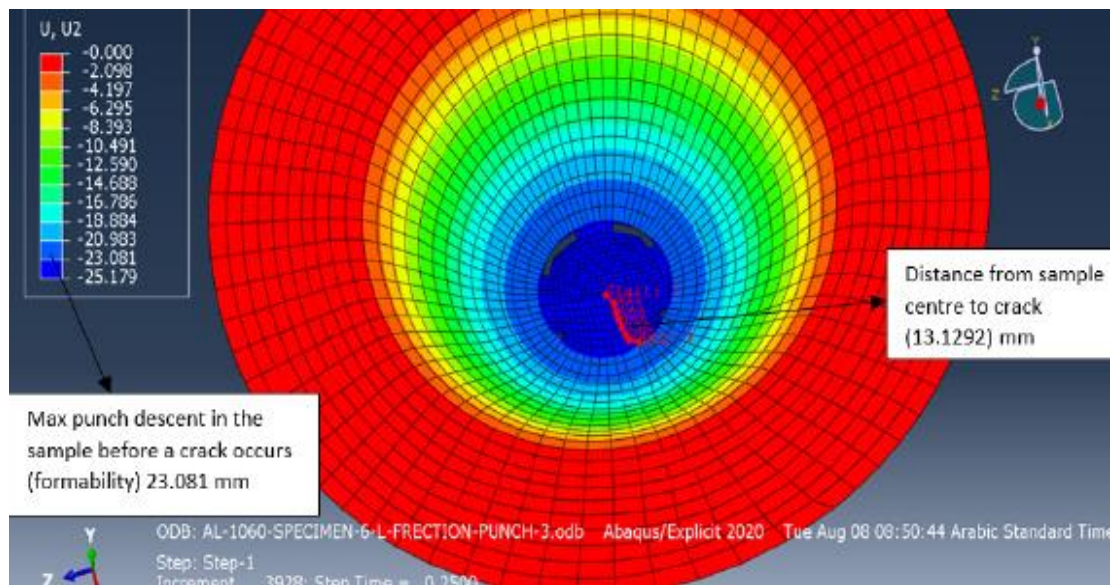


Figura 3.23. Zona de fractura experimentada para un coeficiente de fricción de 0.1 [52].

Correspondiente a los FLDs, como ya se mencionó en el capítulo 2, las deformaciones que se midieron fueron obtenidas de 2 criterios, el primero de ellos, en un paso o tiempo de simulación correspondiente al punto máximo de carga en las curvas carga-desplazamiento, Figura 3.18, para cada blanco. El segundo, fue obtenido en un paso o tiempo en el cual la carga en la gráfica ya había caído casi por completo, y mostraba un comportamiento constante en las curvas mencionadas.

El programa muestra los datos de deformación para el eje X y eje Y, para cada uno de los puntos y pasos seleccionados de la simulación. Un ejemplo de cómo son mostradas las deformaciones es la Tabla 3.9. Únicamente se tomaron los valores de los pasos 240, 236, 252, 296, 280, 280 y 268 para el primer conjunto donde la fuerza alcanza su valor máximo. El segundo conjunto corresponde a los pasos 366, 336, 376, 360, 330, 338 y 340 en un paso o tiempo de simulación según se describió en párrafos anteriores. Todo lo anterior fue obtenido para los tamaños de blancos 82x82, 82x70, 82x58, 82x46, 82x34, 82x 22 y 82x10 mm, respectivamente en ambos conjuntos de deformaciones.

Tabla 3.9. Deformaciones en el blanco de 82x82 mm del primer conjunto de deformaciones obtenidas en la simulación.

Punto	Deformación en X	Deformación en Y
1	0.0561	0.0543
2	0.0573	0.0540
3	0.0584	0.0694
4	0.0645	0.0837
5	0.0641	0.0788
6	0.0652	0.0813
7	0.0644	0.0865
8	0.0689	0.0853
9	0.0675	0.0849
10	0.0671	0.0879
11	0.0687	0.0942
12	0.0692	0.0954
13	0.0638	0.0648
14	0.0626	0.0511
15	0.0544	0.0275
16	0.0479	0.0258
17	0.0404	0.0263
18	0.0326	0.0270
19	0.0260	0.0277
20	0.0237	0.0246
21	0.0194	0.0230
22	0.0155	0.0213
23	0.0134	0.0185
24	0.0093	0.0168
25	0.0065	0.0140

Las Figuras 3.24 y 3.25 muestran las deformaciones para el primer y segundo conjunto de deformaciones, respectivamente ubicados por colores según el ancho de blanco. Se puede visualizar como es que al cambiar el ancho del blanco se genera un estado de deformación diferente. Los blancos con mayor ancho, 82x82 y 82x70 mm tienen deformaciones positivas, es decir, presentan un crecimiento tanto para la dirección X como para la dirección Y. Cuando se reduce el ancho del blanco, la deformación menor toma valores negativos. Los blancos de menor ancho como lo son 82x10, 82x22 y 82x34, presentan deformaciones pertenecientes al lado izquierdo del diagrama, donde en una dirección presenta un alargamiento y en una compresión. Los blancos de 82x58 y 82x46 mm presenta deformaciones cercanas al eje Y, por lo tanto, los puntos están de ambos lados del diagrama.

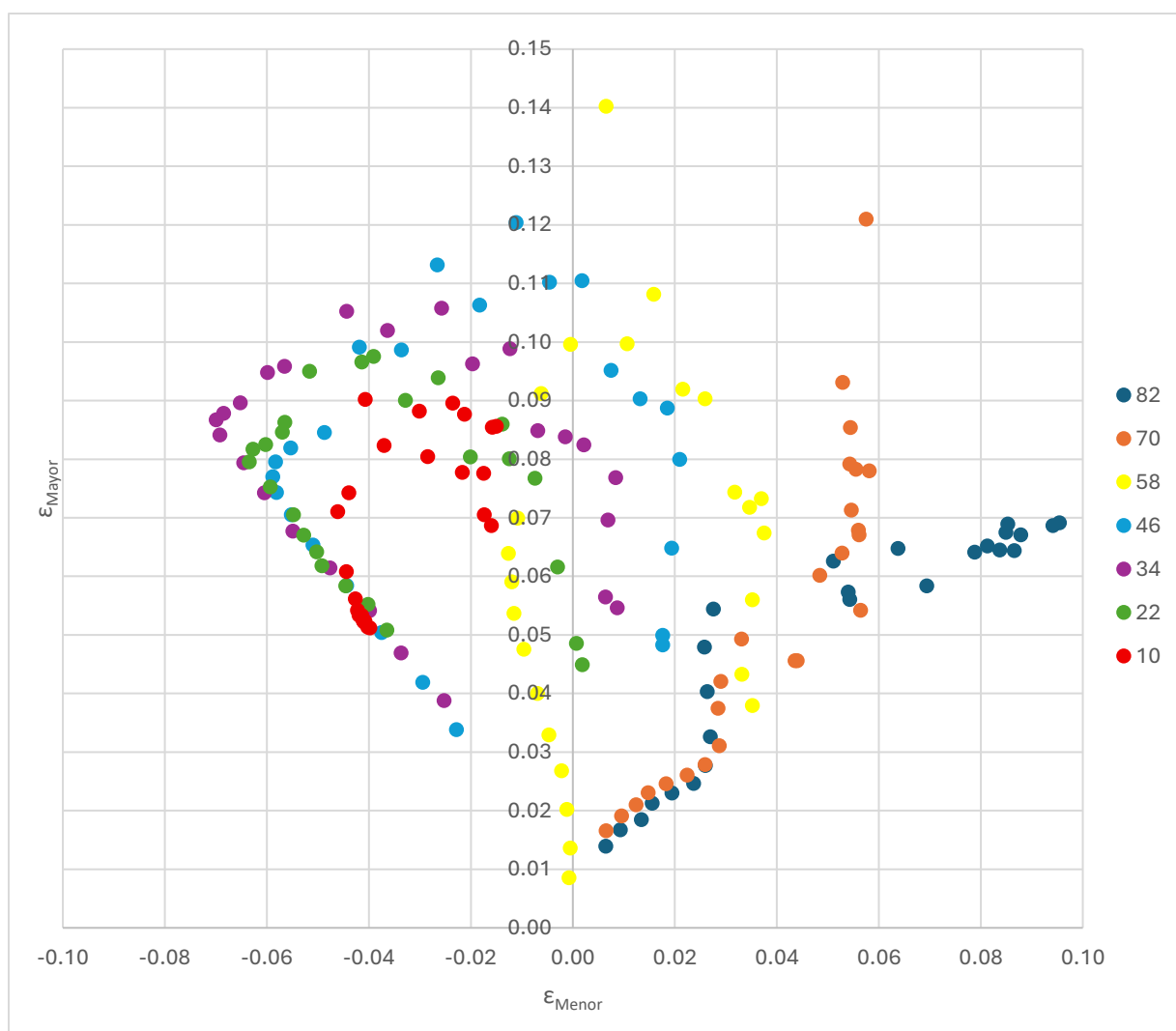


Figura 3.24. Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco para el primer conjunto de deformaciones.

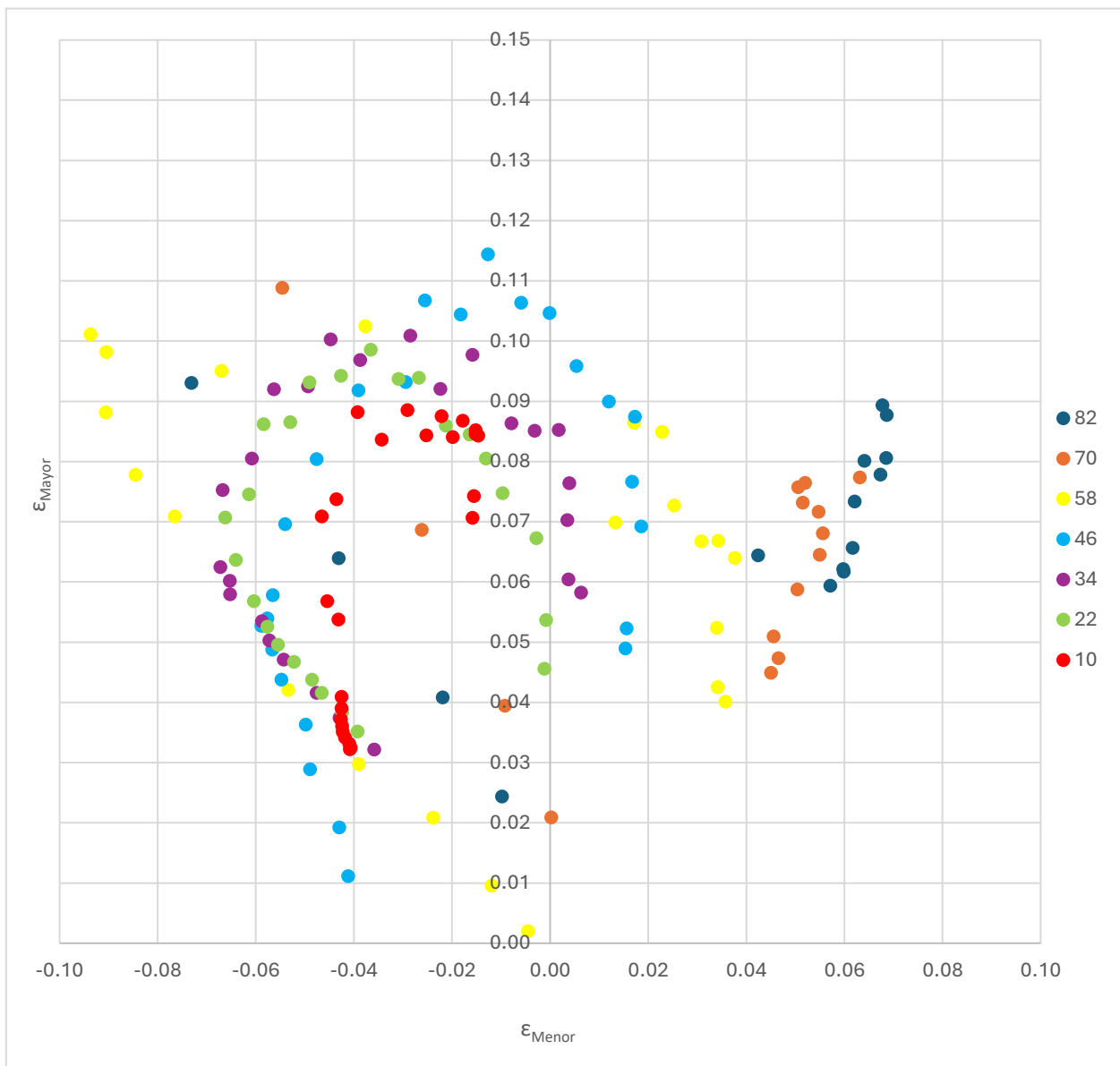


Figura 3.25 Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco para el segundo conjunto de deformaciones.

Se realizó un ajuste estadístico de los valores de los puntos para cada lado del diagrama, del lado izquierdo se utilizó un ajuste lineal, mientras que del lado derecho un ajuste logarítmico. Sin embargo, debido a la gran dispersión de puntos los valores del coeficiente de correlación son bajos. Las deformaciones obtenidas fueron graficadas para obtener el diagrama límite de formado de AA6082-T6. Es posible observar que, si se toman los valores del segundo conjunto de deformaciones, los límites de deformación en el lado izquierdo del diagrama se expanden ligeramente hacia valores más negativos en deformación menor y hacia valores más positivos en deformación mayor, teniendo un

intervalo más amplio de deformación, esto es debido a que la lámina ha sufrido una mayor deformación de tensión. Sin embargo, el segundo diagrama, en el lado derecho tiene valores menores en ambas deformaciones que el FLD generado con el primer conjunto de deformaciones. El diagrama generado con el primer criterio mostrado en la Figura 3.23, presenta una región más amplia de formado en el lado derecho, al igual que tiene un mayor valor en DP. Esta reducción de valores en ambos puntos puede ser debido a que mientras mayor deformación ocurre sobre la lámina, el estado de deformación es mayormente en tensión, ya que, al adelgazarse el material únicamente se alargará en una sola dirección.

3.7. Prueba de Nakazima y medición de deformaciones para construcción del Diagrama Límite de Formado experimental.

Los blancos después de la prueba de Nakazima se muestran en la Figura 3.26. Los blancos con un ancho de 34, 22 y 10 mm se fracturaron en la zona del radio de entrada al dado superior, cercana a la ranura de sujeción, como lo predice el programa, esto se puede observar en la Tabla 3.8.



Figura 3.26. Blancos utilizados en la prueba de Nakazima después de la prueba.

Los blancos con mayor ancho no llegaron a la fractura completamente, debido a 2 razones: la primera debido a que el tipo de resortes utilizados, no proporcionaron la fuerza de sujeción necesaria y la segunda es que las condiciones de lubricación probablemente no se reprodujeron con exactitud igual que la simulación, aunque se debe comentar que si se usó lubricante durante las pruebas. Es posible observar que tuvieron un ligero desplazamiento hacia el interior del dado, es decir, hubo un cierto componente del proceso de embutido durante la prueba, observado en la Figura 3.27, atribuido a la capacidad de carga de los resortes. Por otro lado, el *software* utilizado permitió medir las

longitudes de cada uno de los ejes de los círculos de la malla para calcular las deformaciones en todas las muestras y graficarlas para construir el FLD. Se visualiza uno de los círculos deformados después de la prueba en la Figura 3.28.

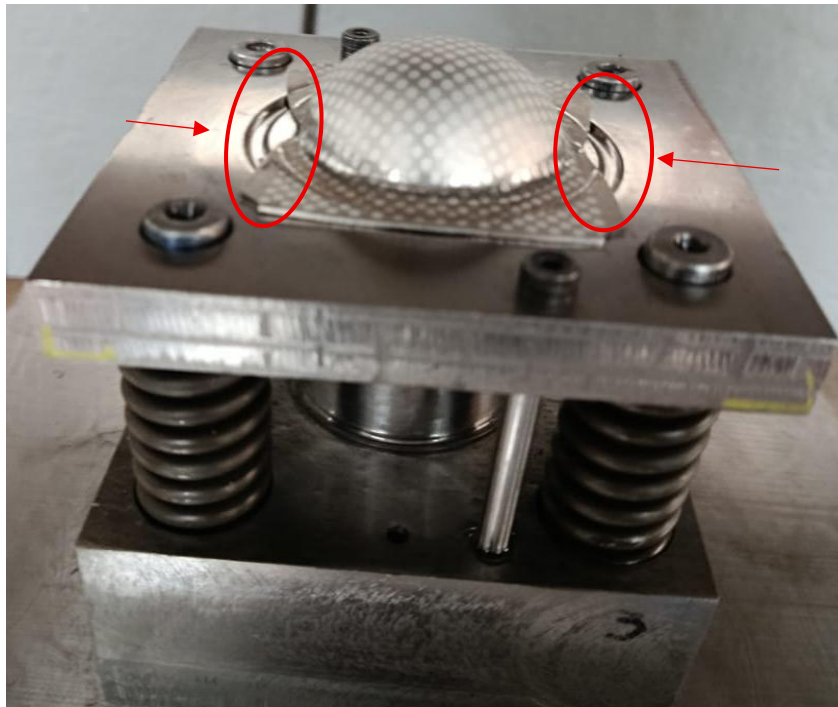


Figura 3.27. Efecto del desplazamiento del blanco de 82x58 mm durante la prueba de Nakazima.

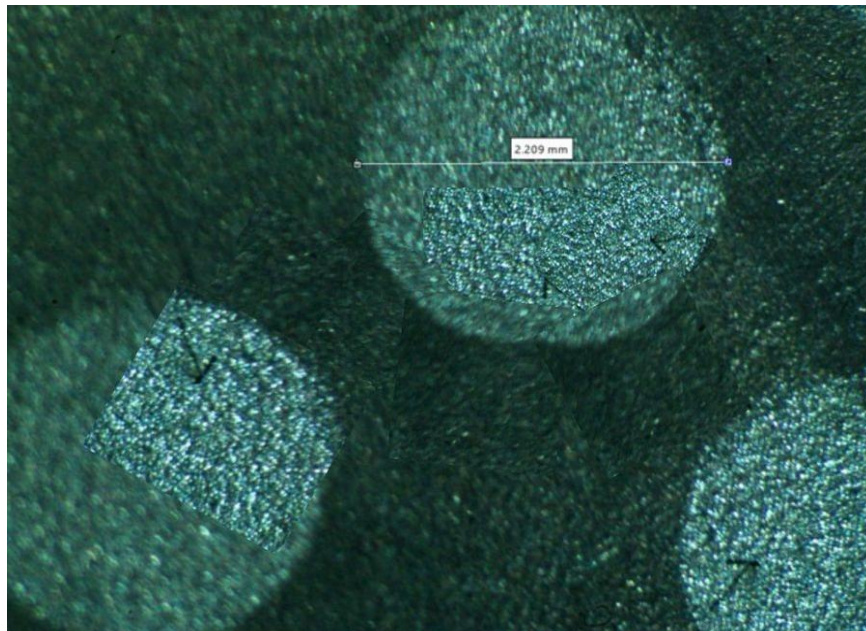


Figura 3.28. Círculo grabado sobre la muestra de 82x82 mm, después de la prueba de Nakazima.

La Figura 3.29 muestra el gráfico de las deformaciones medidas para cada ancho de blanco, observando los diferentes estados de deformación generados en cada uno de ellos.

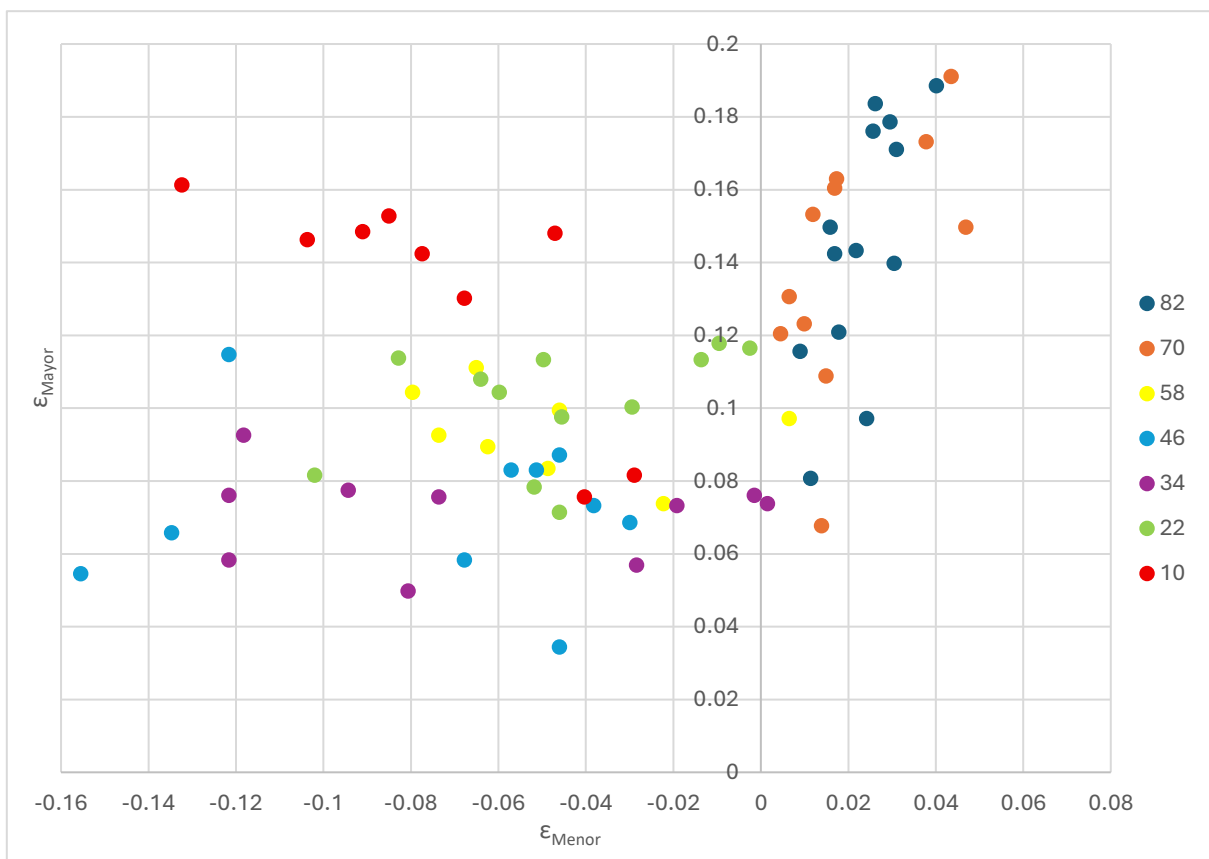


Figura 3.29. Distribución de las deformaciones generadas por cada blanco después de la prueba de Nakazima.

Los diagramas contruidos por medio de simulación y a través de experimentación se muestran en la Figura 3.30. El diagrama experimental tiene límites: DU (-0.14, 0.16), DP (0.0, 0.065) y DB (0.05, 0.17). Presenta un mayor intervalo de deformación en el lado izquierdo que los diagramas simulados, de igual manera que su punto de deformación plana es mayor. Sin embargo, del lado derecho, aunque presenta un valor más alto de deformación mayor, su deformación menor es 0.05, cercano a la mitad al valor encontrado en simulación. Dichas diferencias, pueden ser provocadas debido a que el lado derecho del diagrama está representado por las muestras de mayor ancho, en las cuales, al no llegar completamente a la fractura, sus deformaciones no fueron iguales que las encontradas en el programa de simulación, por lo tanto, exhibieron deformaciones

menores. Del lado izquierdo del diagrama, existe una mejor correlación, ya que, las muestras si llegaron a la fractura.

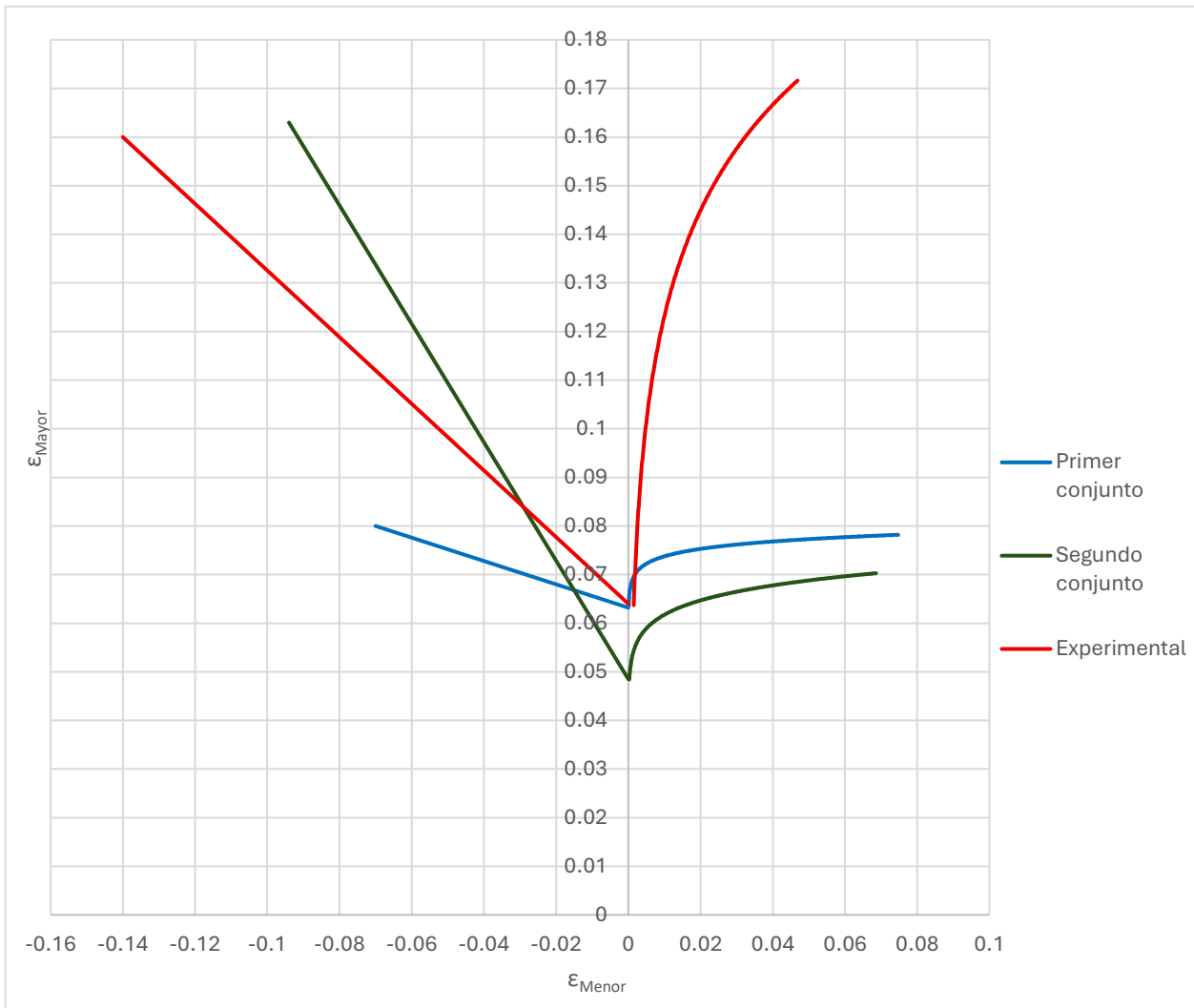


Figura 3.30. Diagramas límite de formado realizados por simulación y experimentalmente mediante la prueba de Nakazima.

Es importante mencionar que, si se considera el primer diagrama simulado y el experimental, el punto de deformación plana es igual en ambos FLDs, pero, en el desarrollado por experimentación las curvas límite de formado se desplazan hacia arriba, es decir, tienen mayor intervalo de deformación. El modelo de simulación predice de manera más acertada la región izquierda del diagrama, así como el FLD_0 , mientras que el lado derecho no muestra una buena correlación.

Además de medir las deformaciones sobre los blancos después de la prueba de Nakazima, se preparó metalográficamente el blanco de 82x82 mm para observar la microestructura sobre la muestra ya deformada. La microestructura del blanco después de la prueba se muestra en la Figura 3.31. Se pueden observar los precipitados caracterizados en la sección 3.1, alineados debido a la naturaleza de la prueba, además, se visualizan ligeramente límites de grano con un ligero alargamiento en dirección del formado.

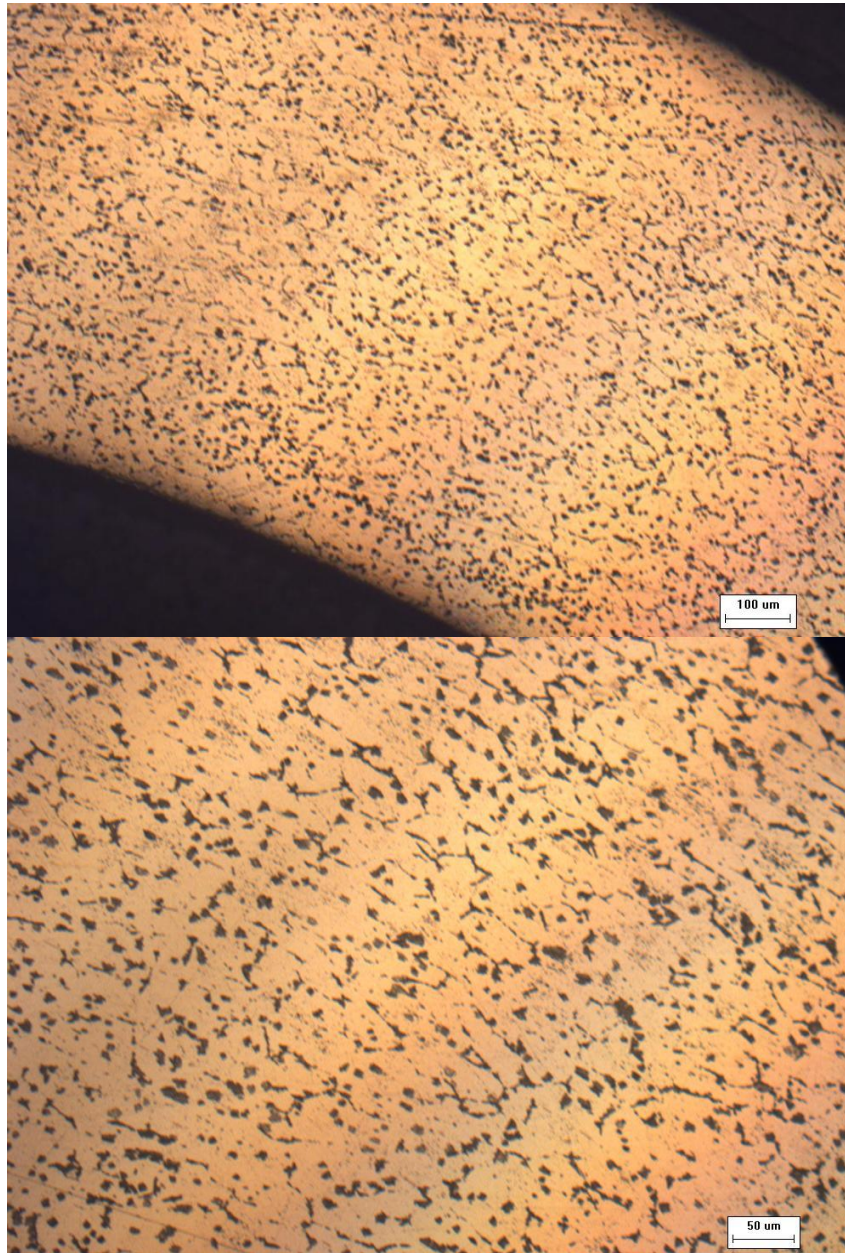


Figura 3.31. Microestructura de AA6082-T6 después de la prueba de Nakazima.

Después del análisis de los diagramas obtenidos por simulación y de forma experimental, fueron comparados con otras referencias sobre la misma aleación obtenidos por distintas pruebas experimentales. La Figura 3.32 muestra un FLD realizado experimentalmente para la aleación AA6082-T6 con un espesor de 1 mm [53], y obtenido mediante el método de Marciniak (utilizando un herramental distinto, el cual puede tener un impacto importante en las deformaciones generadas). Aunque la prueba difiere ligeramente en la geometría del herramental, los valores de deformación menor, límites de deformación hacia los lados del diagrama, reportados son similares a los de este trabajo encontrados por simulación, destacando que su análisis es para la misma aleación, estado de tratamiento térmico y espesor de lámina. Los límites de deformación aproximados del FLD experimental son: DU = (-0.06, 0.14), DP = (0, 0.12) y DB = (0.08, 0.17).

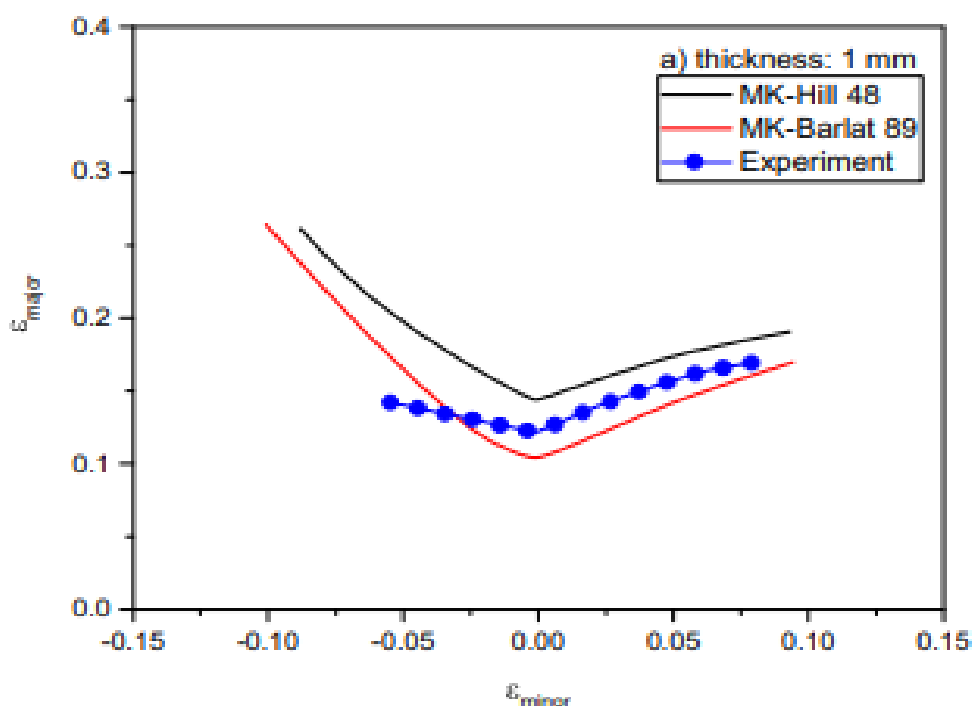


Figura 3.32. FLD realizado experimentalmente para una lámina de AA6082-T6 con 1 mm de espesor mediante el método de Marciniak [53].

En otro estudio [54] donde se realizó el FLD de la misma aleación, AA6082 de forma experimental, con un espesor de muestra de 1 mm a temperatura ambiente, se encontraron valores similares de deformación al del presente trabajo en ambos ejes del diagrama, Figura 3.33. El método por el cual fue construido fue por un proceso de estirado de lámina, similar a la prueba de Nakazima. Se utilizaron 5 blancos con diferentes anchos

para crear los diferentes estados de deformación. Las deformaciones fueron medidas en dos momentos distintos durante la prueba, para la construcción del diagrama. Una primera medición en donde se forma el encuellamiento de la lámina y posteriormente, cuando la muestra ya fue fracturada. Se obtuvieron límites de deformación aproximados de $DU = (-0.075, 0.12)$, $DP = (0, 0.06)$ y $DB = (0.1, 0.1)$.

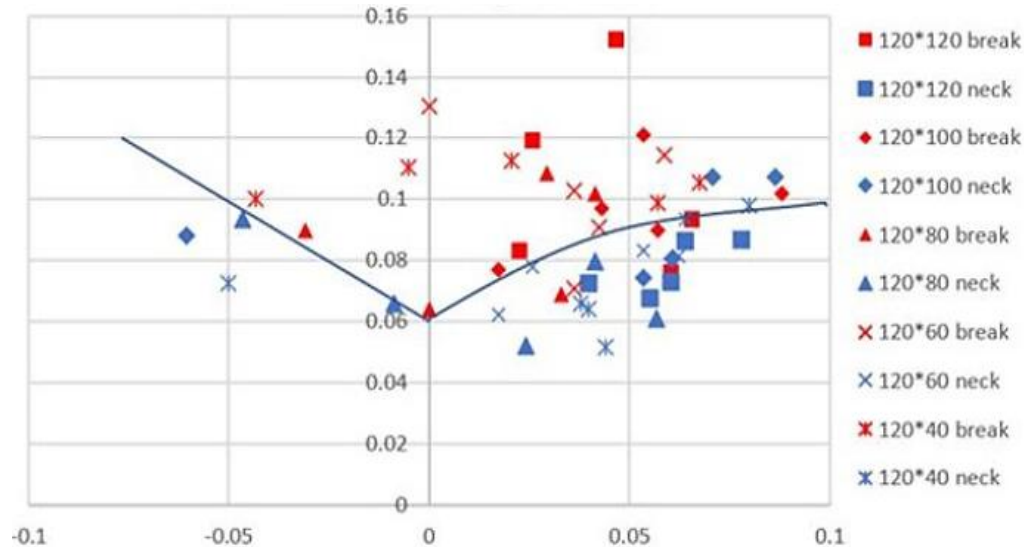


Figura 3.33. FLD realizado experimentalmente para una lámina de AA6082 con 1 mm de espesor mediante prueba de estirado de lámina [54].

Para la misma serie de aleación 6XXX, se analizan 3 FLDs en otras referencias. En una AA6063 (1 mm de espesor), se desarrolló un FLD mediante pruebas experimentales de Nakazima y simulación numérica (Figura 3.34) [55]. Los valores de los límites de formado fueron $DU = (-0.08, 0.15)$, $DB = (0.12, 0.11)$ y $DP = (0, 0.08)$, observándose que los datos de simulación se correlacionaron mejor en el lado izquierdo del diagrama.

Para el FLD de AA6061-T6 (1.5 mm) [56], obtenido experimentalmente mediante estirado de lámina (Figura 3.35), se registraron límites superiores $DU = (-0.22, 0.42)$, $DB = (0.16, 0.22)$, $DP = (0, 0.22)$, los cuales fueron asociados a un espesor mayor.

Adicionalmente, se desarrolló un FLD para AA6013-T6 [57] con 2 mm de espesor, evaluado con la prueba de Nakazima para dos criterios distintos, zona de encuellamiento (NZ) y método ISO 12004-2:008 y a 2 temperaturas distintas. El diagrama generado por NZ, similar al empleado en este estudio, a temperatura ambiente presenta valores de $DU = (-0.05, 0.22)$, $DB = (0.25, 0.30)$ y $DP = (0, 0.17)$ y se muestra en la Figura 3.36.

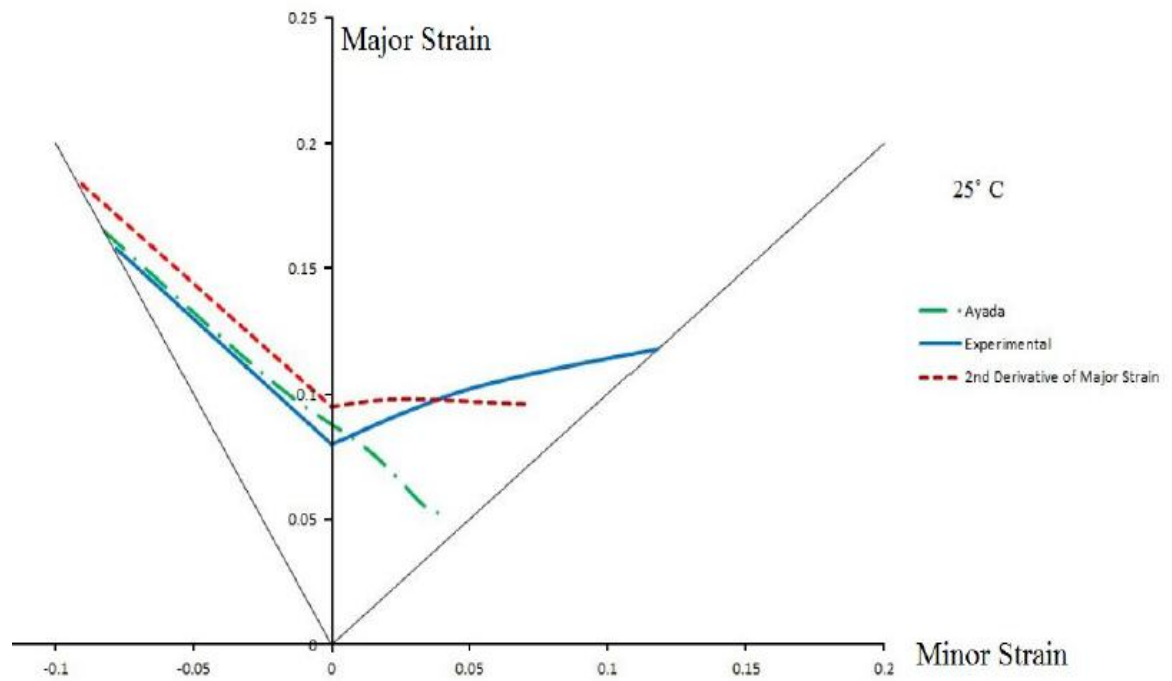


Figura 3.34. Diagrama Límite de Formado para AA6063 [55].

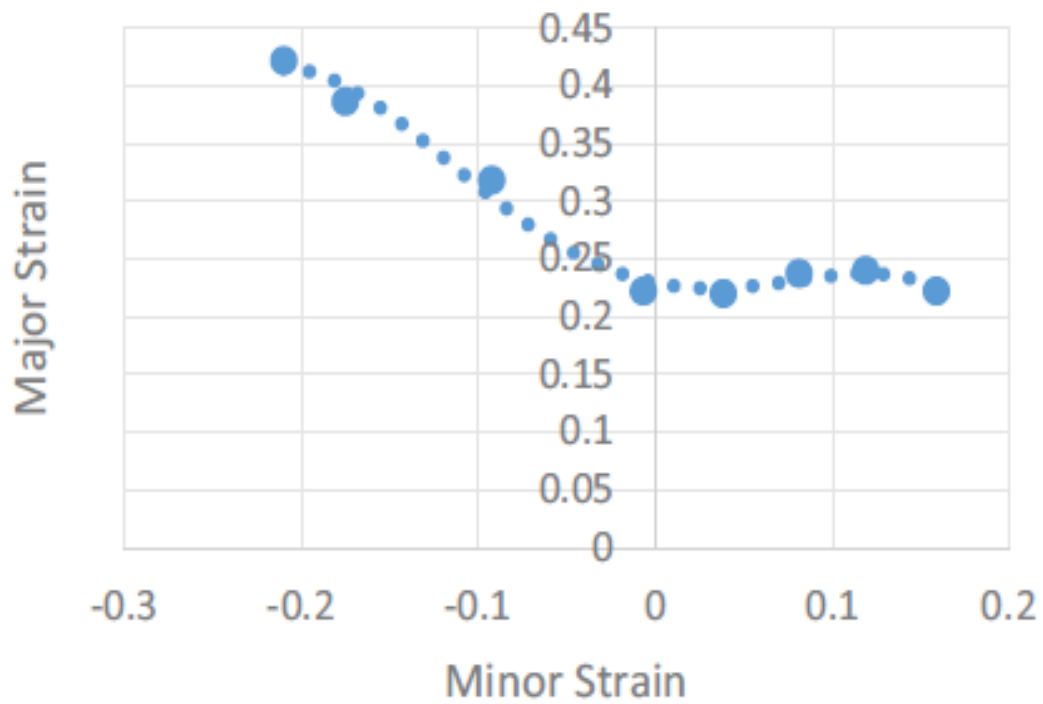


Figura 3.35. Diagrama Límite de Formado para AA6061-T6 [56].

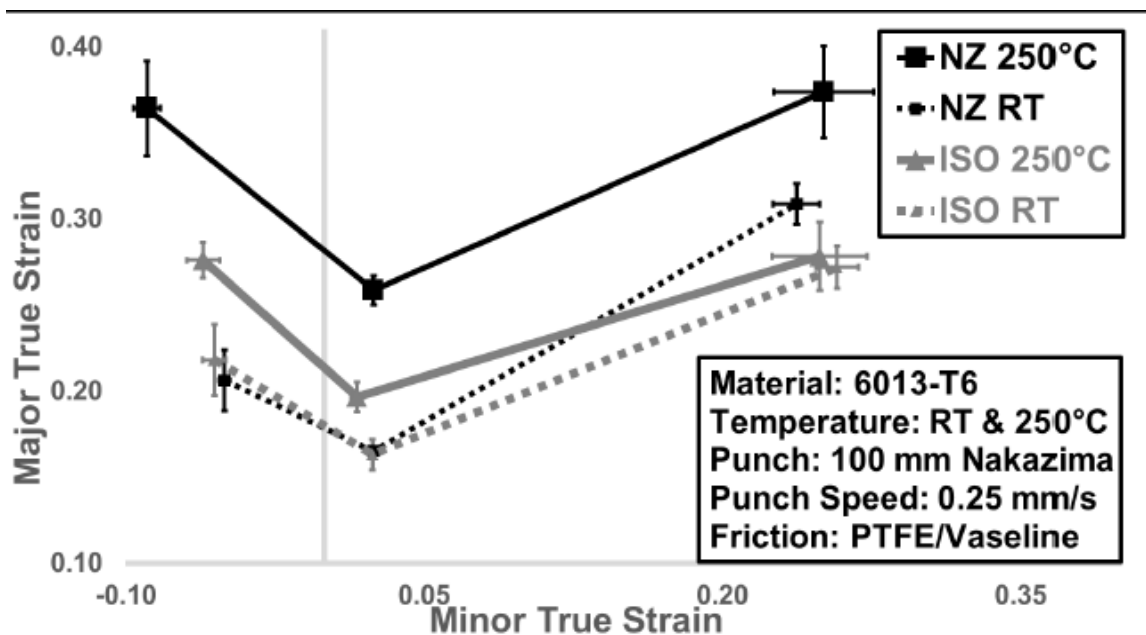


Figura 3.36. Diagrama Límite de Formado para AA6013- T6 evaluado bajo 2 distintos métodos [57].

En la Tabla 3.10 se muestra una comparación de los tres puntos de deformación principales del FLD de las distintas aleaciones de la serie 6XXX consultadas, además de la comparación con los diagramas realizados en este proyecto de tesis. Analizando principalmente los FLD de AA6082, los puntos DP son similares en todos los diagramas con un valor de 0.06, exceptuando el valor al realizado mediante la prueba de Marciniak que presenta un valor de 0.12. El lado izquierdo del diagrama realizado en este trabajo de forma experimental tiene mayor semejanza con la investigación mostrada en la referencia [54], sin embargo, la diferencia de deformación menor es de 0.06 en el punto DB. En el lado derecho, en el punto DB se aproxima más al valor de deformación menor de la referencia [53] con una diferencia de deformación de 0.03.

Los límites de deformación de AA6061 y AA6013 de los trabajos analizados tienen valores más amplios en los diagramas, su formabilidad no es comparable con AA6082, sin embargo, los límites de AA6063 son similares a los encontrados en este trabajo y a los experimentales de la misma aleación reportados en otras referencias. Las discrepancias en los valores de deformación, además, de ser correlacionados a la distinta cantidad de elementos aleantes, también puede asociarse al tipo de prueba realizada, espesor de lámina y desviaciones de las condiciones de fricción, las cuales tienen un impacto significativo en los resultados de la prueba.

Tabla 3.10. Comparación de DU, DB y DP en distintas aleaciones de la serie 6XXX de aluminio y los diagramas desarrollados en este trabajo.

	DU		DB		DP	
Aleación	ϵ Mayor	ϵ Menor	ϵ Mayor	ϵ Menor	ϵ Mayor	ϵ Menor
AA6082-T6, simulación primer conjunto.	0.08	-0.07	0.075	0.072	0.0632	0
AA6082-T6, simulación segundo conjunto.	0.163	-0.094	0.07	0.07	0.05	0
AA6082-T6, experimental en el presente trabajo.	0.16	-0.14	0.16	0.05	0.065	0
Experimental AA6082-T6, Marciniak [53].	0.14	-0.06	0.17	0.08	0.12	0
Experimental AA6082, estirado [54].	0.12	-0.075	0.1	0.1	0.06	0
AA6063 [55].	0.15	-0.08	0.12	0.12	0.08	0
AA6061-T6 [56].	0.42	-0.22	0.22	0.16	0.27	0
AA6013-T6 [57].	0.22	-0.05	0.30	0.25	0.17	0

El presente trabajo fue realizado a través del programa DEFORM-3D, con el cual no se había reportado ningún trabajo utilizando este *software* de simulación para obtener FLDs. Para AA6082-T6 no se tenía un FLD desarrollado por medio de simulación. Se destaca también la optimización de parámetros del herramental que tienen una influencia directa en la carga de sujeción y que son ajustadas de acuerdo con la capacidad local del laboratorio. Además de la validación del programa realizando pruebas de simulación y experimentales. En la industria automotriz, la validación de modelos FEM frente a resultados experimentales es una práctica común para ajustar parámetros antes de la producción, en este trabajo se analizan ambas metodologías para hacer la validación del proceso de formado.

Por otro lado, es importante mencionar que el estado de tratamiento térmico de la aleación también tiene influencia en los límites del diagrama debido al endurecimiento obtenido. Como se ha mencionado anteriormente, la aleación usada en el presente

trabajo tiene un tratamiento térmico T6 con sobre envejecimiento, lo que le confiere esa región de formado y curvas características al FLD. Sin embargo, si se tuviera otro estado de tratamiento térmico las curvas serían desplazadas dependiendo del estado de tratamiento térmico.

Son mostrados dos ejemplos de dichos trabajos. M. Fallah et. al. [58] realizaron una investigación acerca del efecto de la microestructura y del tiempo de envejecimiento en las propiedades de formado de AA2024-T4. Se construyó, a través de la prueba de Nakazima, un FLD para la aleación después de los diferentes estados de tratamiento térmico. Se evaluaron 0.5, 1.5, 4 y 24 horas de envejecimiento. Se obtuvo un decremento de la formabilidad al aumentar el tiempo de tratamiento térmico, Figura 3.37. El tamaño y numero de los precipitados aumentan con el incremento del tiempo de envejecido, además, para un tiempo de 24 hrs. se tiene una distribución más homogénea de los precipitados [58]. En la Tabla 3.11 se observan los valores de deformación plana, la cual tiene una diferencia significativa entre las condiciones de los extremos, y un notable decremento desde la condición de 1.5 a 4 h. Esto debido al mayor tamaño y distribución de los precipitados.

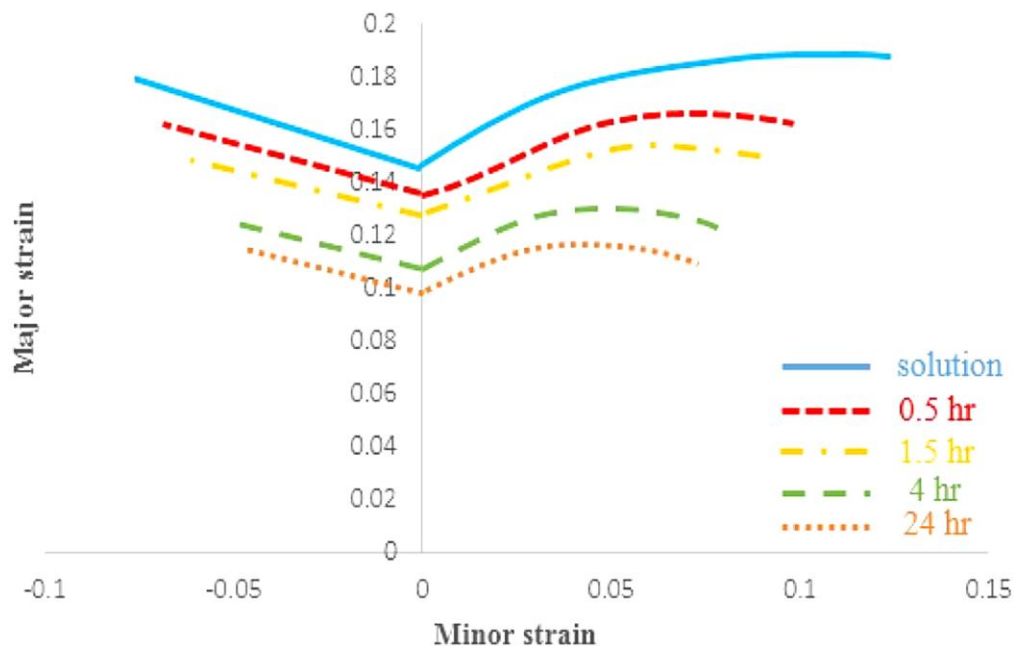


Figura 3.37. FLDs para todas las condiciones de tratamiento térmico de AA2024 -T6 [58].

Tabla 3.11. Propiedades mecánicas y de formado para AA2024 [58].

Condición.	Microdureza (HV).	UTS (MPa).	YS (MPa).	FLD₀.	Elongación a la fractura.
Sin envejecimiento.	70	313	110	0.149	15.4
0.5 h envejecimiento	97	329	130	0.139	14.8
1.5 h envejecimiento.	110	343	160	0.13	14.2
4 h envejecimiento.	136	385	205	0.108	13.3
24 h envejecimiento.	145	411	247	0.1	12.9

En la referencia [59], se utiliza una lámina de AA7075-T6 con un espesor de 0.76 mm, para observar el efecto de la microestructura y tratamiento térmico en la construcción de un FLD, además de evaluar en dirección transversal y longitudinal a la dirección de laminación. Se analizaron dos estados de tratamiento térmico de envejecimiento, con bajo envejecimiento, UA, (121°C por 25 min) y con sobre envejecimiento, OA (177°C por 48 h).

En la Figura 3.38 se observan los FLDs contruidos para cada condición analizada, las curvas punteadas representan el análisis para las muestras en dirección longitudinal a la de laminación y las sólidas para la dirección transversal. También, las líneas denotadas por α , ρ y p , representan estados de deformación utilizados para predecir los límites de deformación. Se observa claramente que, para la condición de bajo envejecimiento, los límites del diagrama son mayores. El punto de deformación plana para dicha condición es aproximadamente 0.2, mientras que para la condición de sobre envejecimiento es menor a 0.1. La condición de bajo envejecimiento muestra una mejor habilidad de endurecimiento por deformación, debido a las zonas GP promovidas por el tratamiento térmico [59].

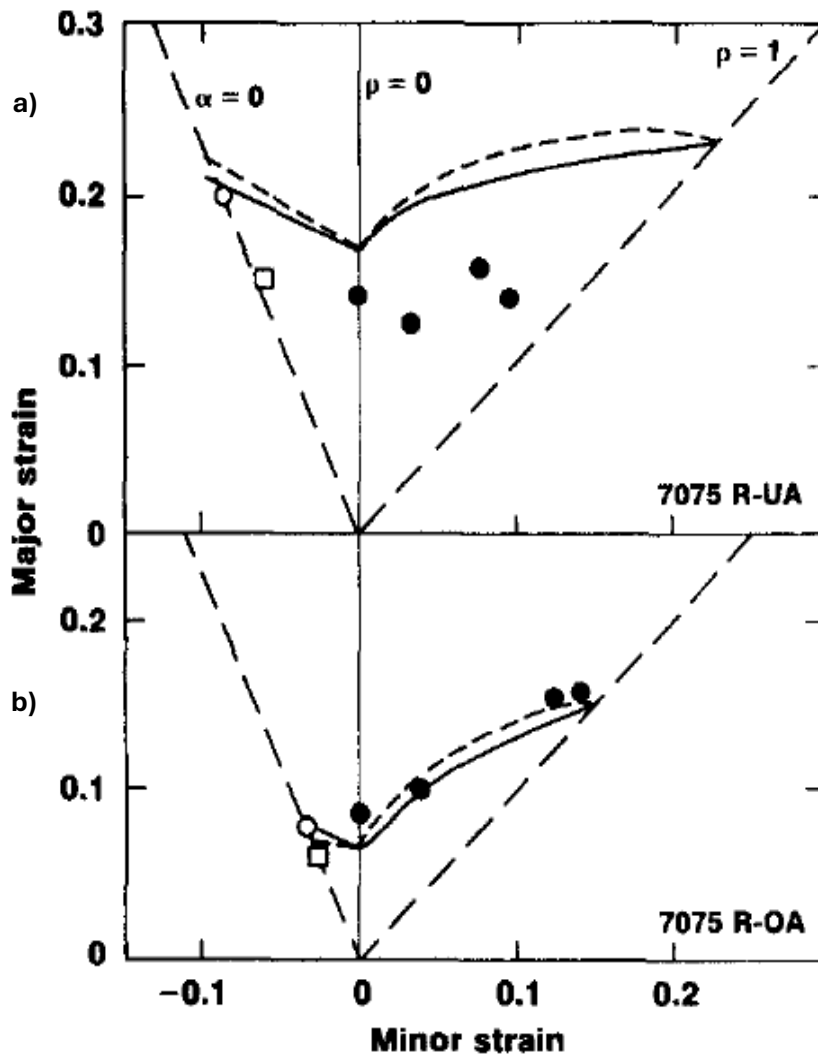


Figura 3.38. FLDs para AA7075 en estado de a) bajo y b) sobre envejecimiento [59].

Finalmente, es importante destacar la dispersión presente en los datos obtenidos durante la prueba. En estudios previos sobre diagramas límite de formado, se ha observado una gran variabilidad en las deformaciones medidas, la cual se ajusta posteriormente para trazar las curvas del límite de formado. Esta dispersión es propia a la naturaleza de la prueba y a los métodos de medición empleados. Un ejemplo de ello es el trabajo de Narayasamy [60], donde se realizó un análisis de formabilidad en diferentes grados de acero y espesores de lámina. En las Figuras 3.39 y 3.40 de su investigación, pueden apreciarse los FLDs obtenidos, los cuales muestran una notable dispersión en los datos de deformación. Aunque no se incluyen valores del coeficiente de correlación, todos los puntos medidos se consideraron para la construcción del diagrama, lo que refleja la práctica habitual en este tipo de estudios.

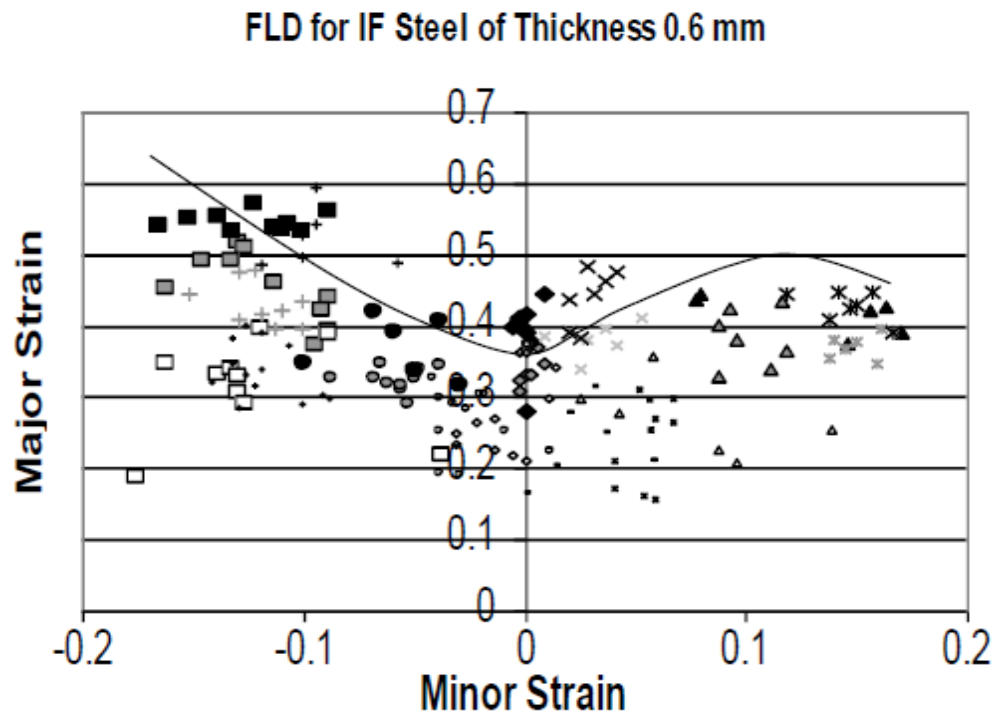


Figura 3.39. FLD obtenido para un acero libre de elementos intersticiales con un espesor de 0.6 mm [60].

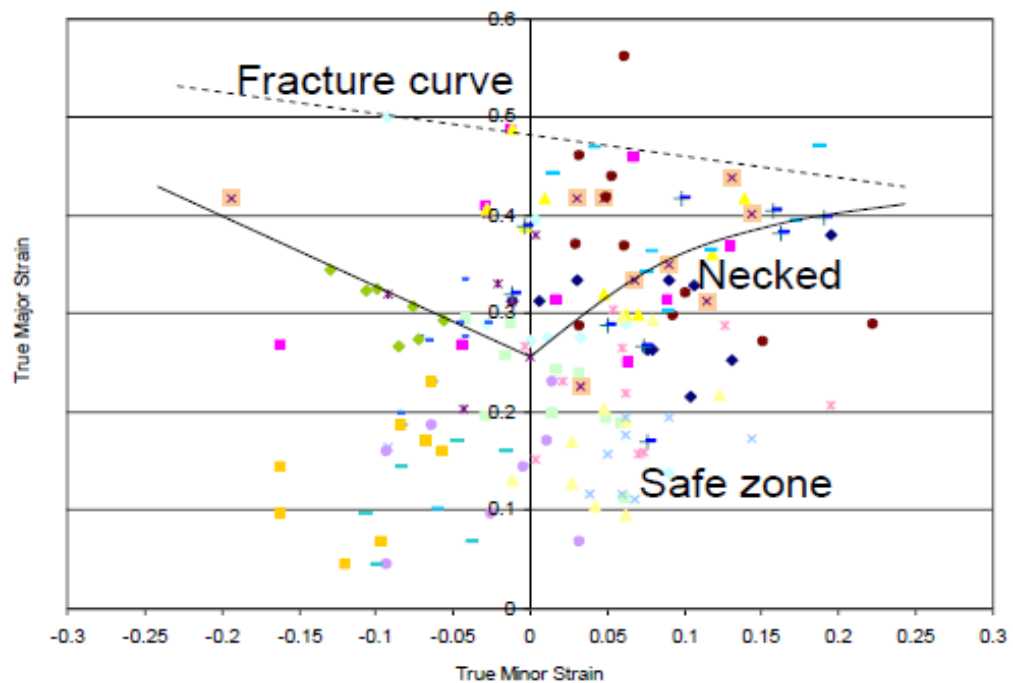


Figura 3.40. FLD obtenido para un acero micro aleado con un espesor de lámina de 1.2 mm [60].

Conclusiones.

En este trabajo se utilizó el software DEFORM-3D v.11 para simular, mediante el método de elementos finitos la prueba de Nakazima, para obtener el diagrama límite de formado de AA6082-T6, el cual fue comparado con el FLD determinado experimentalmente. Las conclusiones de este trabajo fueron las siguientes:

1. Se logró diseñar y construir el modelo numérico de los herramentales para la prueba de Nakazima, optimizando la posición y altura de la ranura. Esta optimización permitió minimizar la carga necesaria durante el proceso de sujeción, cumpliendo con el objetivo de establecer parámetros de diseño eficientes para el herramental.
2. La caracterización microestructural y mecánica de la aleación AA6082-T6 fue utilizada para alimentar el modelo computacional. Asimismo, se establecieron condiciones de frontera adecuadas en el programa DEFORM-3D v.11, lo que permitió reproducir de manera realista la prueba de Nakazima.
3. Se construyeron dos Diagramas Límite de Formado (FLDs) mediante simulación, empleando dos criterios distintos de fractura. El primer criterio mostró mayor correlación con el FLD experimental, especialmente en el lado izquierdo y en el punto de deformación plana, cumpliendo con el objetivo de validar el modelo numérico frente a resultados experimentales.
4. Se fabricaron los componentes del troquel mediante maquinado e impresión 3D, y se realizaron exitosamente las pruebas experimentales de Nakazima. El FLD experimental obtenido para AA6082-T6 resultó consistente con los reportados en la literatura para aleaciones de la serie 6XXX, confirmando la validez del procedimiento.
5. La comparación entre los FLDs obtenidos por simulación y experimentación permitió establecer el diagrama límite de formado de AA6082-T6, cumpliendo con el objetivo general de evaluar su capacidad de conformado para aplicaciones automotrices.
6. Se destaca como aportación original el uso del software DEFORM-3D para la construcción del FLD de AA6082-T6, reportado por primera vez en este trabajo. Utilizando técnicas de dibujo asistido por computadora (CAD), simulación

computacional del proceso de formado (CAE) y de manufactura asistida por computación (CAM).

7. Se recomienda, para trabajos futuros, utilizar resortes con mayor capacidad de carga, incorporar técnicas ópticas como la correlación digital de imágenes para medir deformaciones con mayor precisión, y analizar diferentes estados microestructurales de la aleación.

Anexo 1. Cambios en el diseño del herramental.

A continuación, se enlistan las modificaciones realizadas en las piezas del herramental debido a los resultados de la simulación, errores de diseño o por cambios ingenieriles:

1. Desplazamiento de postes guías y tornillos alineadores:

- Se reubicaron hacia los extremos debido a la longitud máxima del blanco cuadrado (82x82 mm).

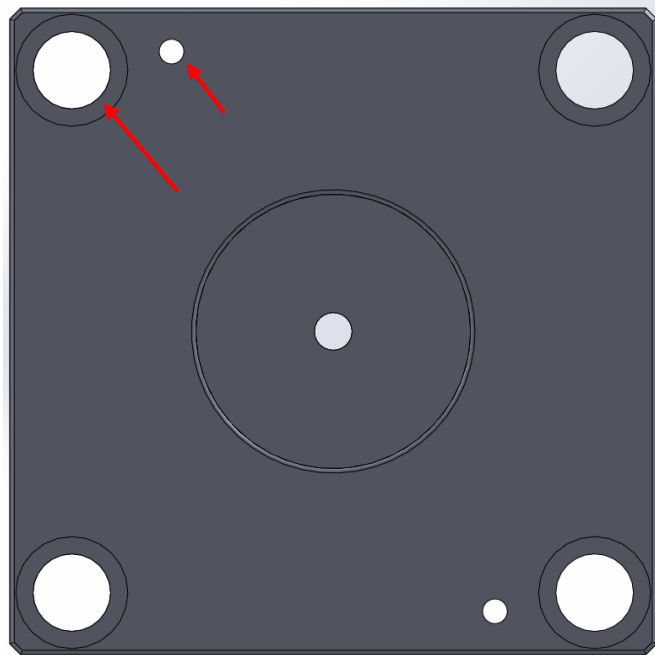


Figura Anexo 1.1. Reubicación de orificios para postes guías y tornillos alineadores.

2. Cambio de posición de ranura y hendidura en herramental:

- **Diseño inicial:** La ranura estaba en el sujetador y la hendidura en el dado superior. Esto dificultaba el posicionamiento de la lámina antes de iniciar las pruebas.
- **Modificación:** La ranura se trasladó al dado superior y la hendidura al sujetador para facilitar el acomodo del blanco antes de la prueba.



Figura Anexo 1.2. Cambio de ranura a hendidura en sujetador.

3. Posición de la ranura:

- **Límite inferior:** Debe ser mayor a 56 mm, ya que el diámetro de la cavidad del sujetador es de 53 mm + radio de entrada de 3 mm.
- **Límite superior:** Menor a 80 mm debido al tamaño de blanco a utilizar y el radio de entrada de 3mm.

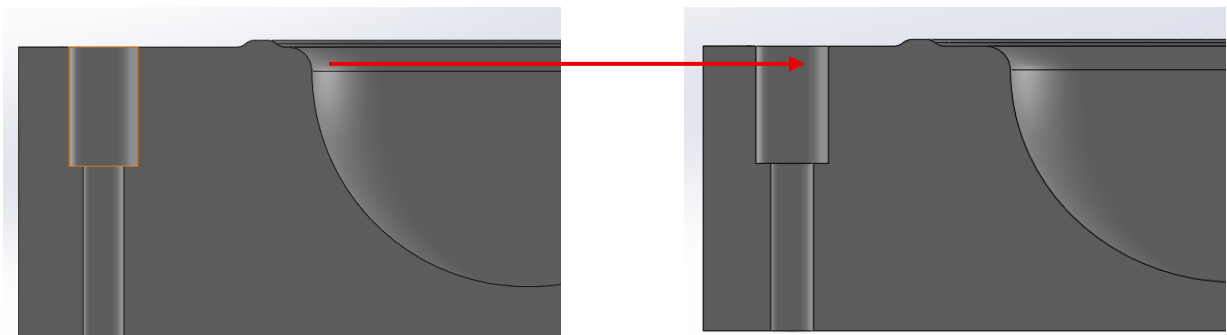


Figura Anexo 1.3. Variación posición de ranura en el dado.

4. Implementación de resortes:

- Se añadieron para aplicar la fuerza de sujeción requerida.
- Se diseñaron cavidades en el sujetador y dado inferior para fijar los resortes en posición y evitar su desplazamiento lateral durante la prueba. Al final, se determinó que hacen falta resortes de mayor capacidad de carga y, además, aumentar 2 cm la longitud del resorte, o en su caso emplear resortes de sección cuadrada.

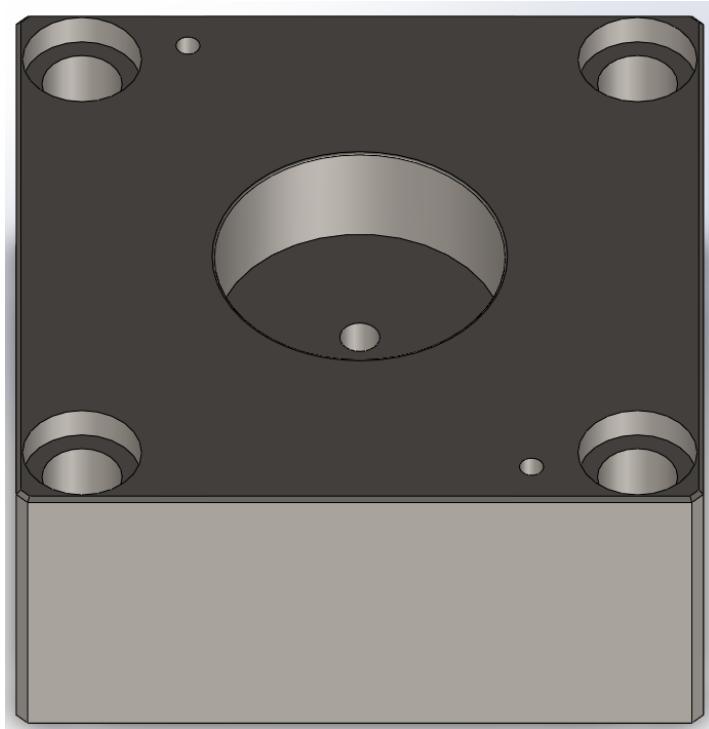


Figura Anexo 1.4. Implementación de cavidades para resortes.

5. Cambio de resortes y ajuste de cajas del dado y sujetador:

- Se seleccionaron resortes con mayor carga debido la fuerza necesaria para la sujeción, ya que, se tenía contemplado un tipo de resorte y después de la simulación de la sujeción del blanco y de los ensayos de compresión del resorte, se comprobó que era necesaria mayor carga, lo que exigió aumentar el diámetro y profundidad de sus cajas.
- Las cajas interferían con la posición de otras piezas, lo que obligó a reubicar postes guías y tornillos alineadores nuevamente, moviéndolos hacia el centro.

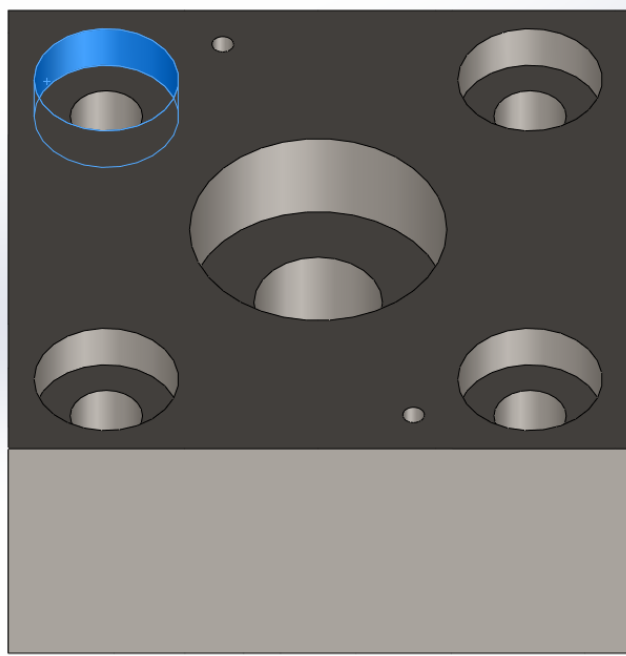


Figura Anexo 1.5. Ajuste de cajas y reubicación de orificios para postes guías.

6. Modificación de geometría en blancos:

- A los blancos de 82 mm y 70 mm se le añadieron radios en las 4 esquinas para evitar interferencias con los postes guías, debido a que, en las modificaciones anteriores se redujo el espacio para el blanco y este interfería con la ubicación de los postes guías.

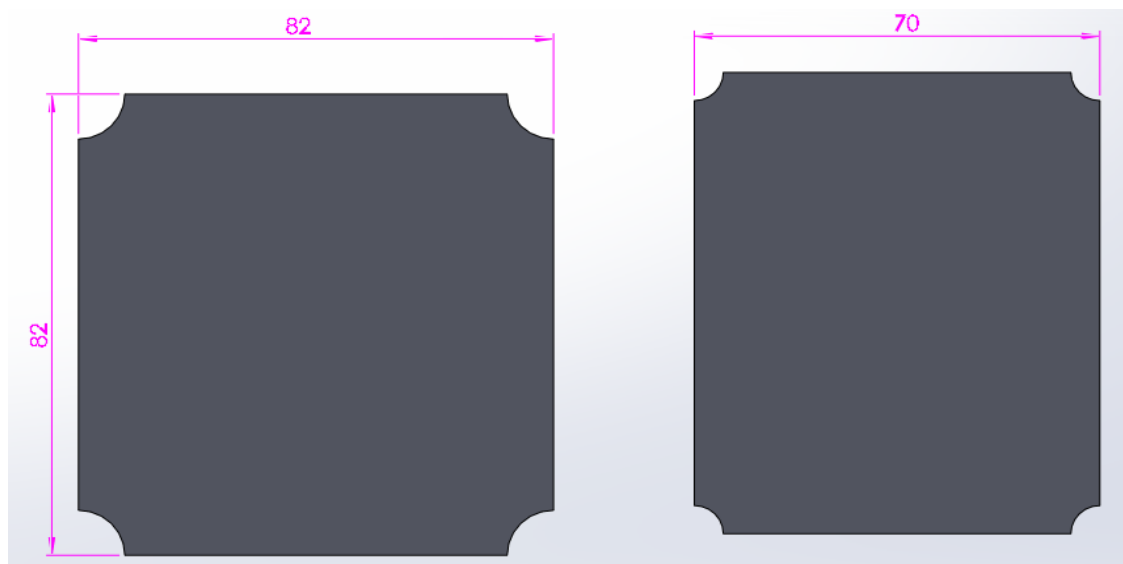


Figura Anexo 1.6. Radios en las esquinas de los blancos de 82x82 y 82x70 mm.

7. Barrenos en el sujetador:

- Se propusieron añadir tres barrenos a 41 mm del centro del ensamble para centrar los blancos antes de la prueba.

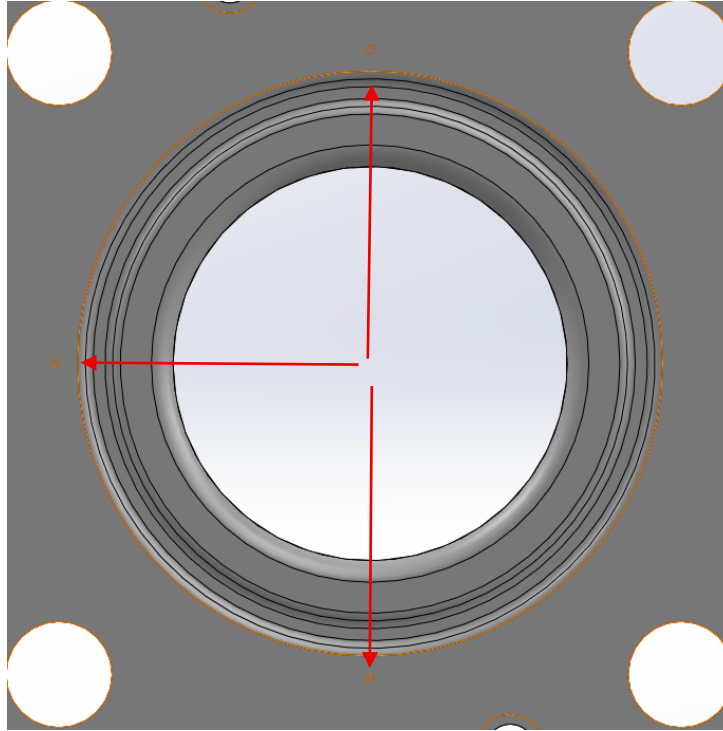


Figura Anexo 1.7. Barrenos en el sujetador para fácil acomodo del blanco.

8. Reubicación de ranura:

- Se movió a 68.5 mm para evitar conflictos con el maquinado del radio de entrada del sujetador. Además de mejorar el área de contacto/sujeción después del proceso de sujeción de lámina.

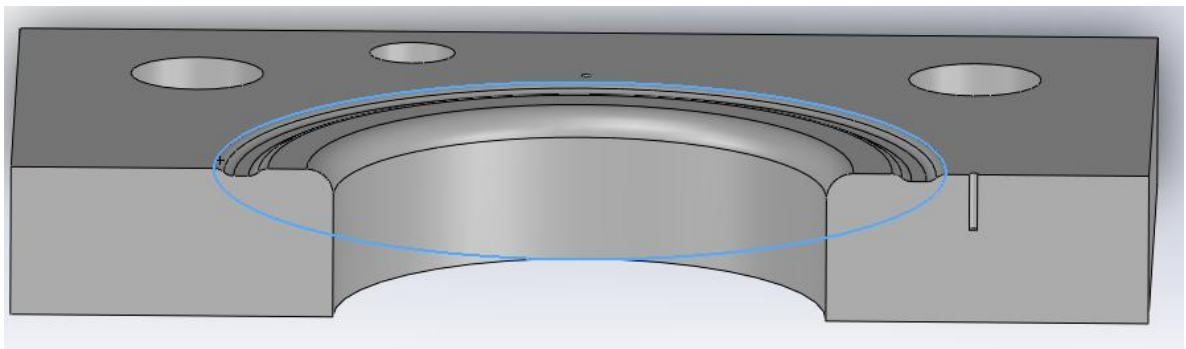


Figura Anexo 1.8. Reubicación de ranura en posición de 68.5 mm.

9. Orificio de liberación de aire:

- Se agregó en el dado superior para evitar acumulación de aire entre la lámina y el herramental durante la prueba de Nakazima.

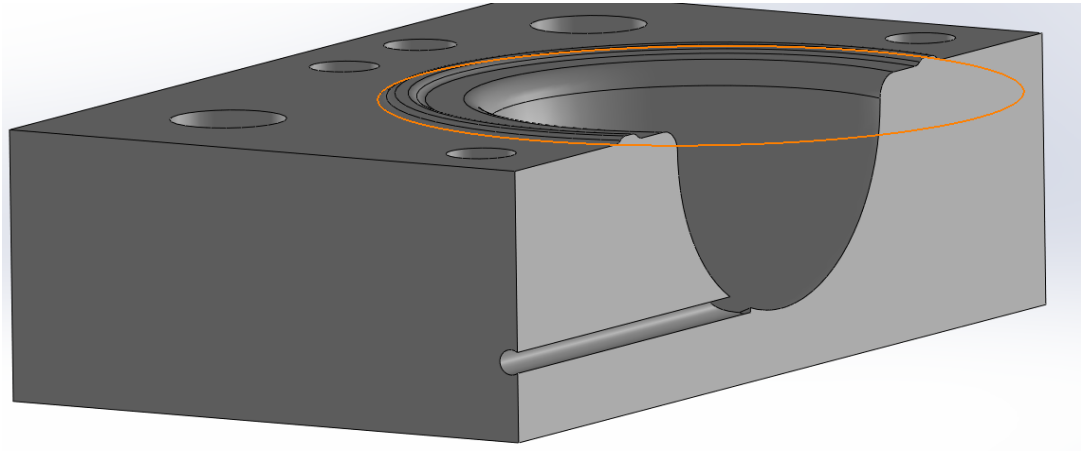


Figura Anexo 1.9. Orificio en dado para liberación de aire.

10. Redimensionamiento de resortes

- Se incrementó su longitud 3 cm para tener un mayor recorrido durante la prueba.

11. Eliminación de cajas de tornillos alineadores:

- Se retiraron del sujetador para aumentar el recorrido del herramental, ya que se elimina el recorrido de la distancia de las cajas de las cabezas de los tornillos.

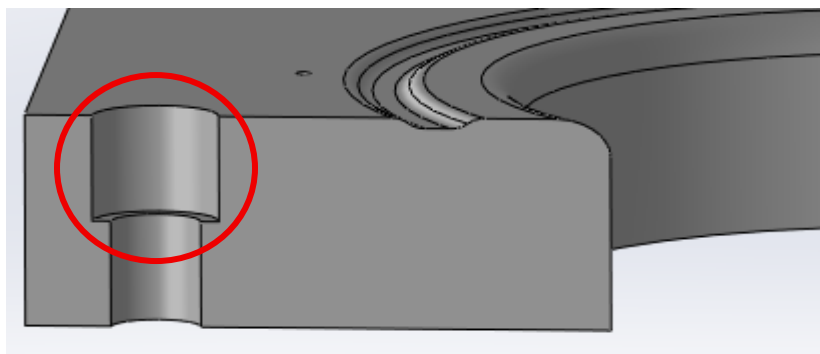
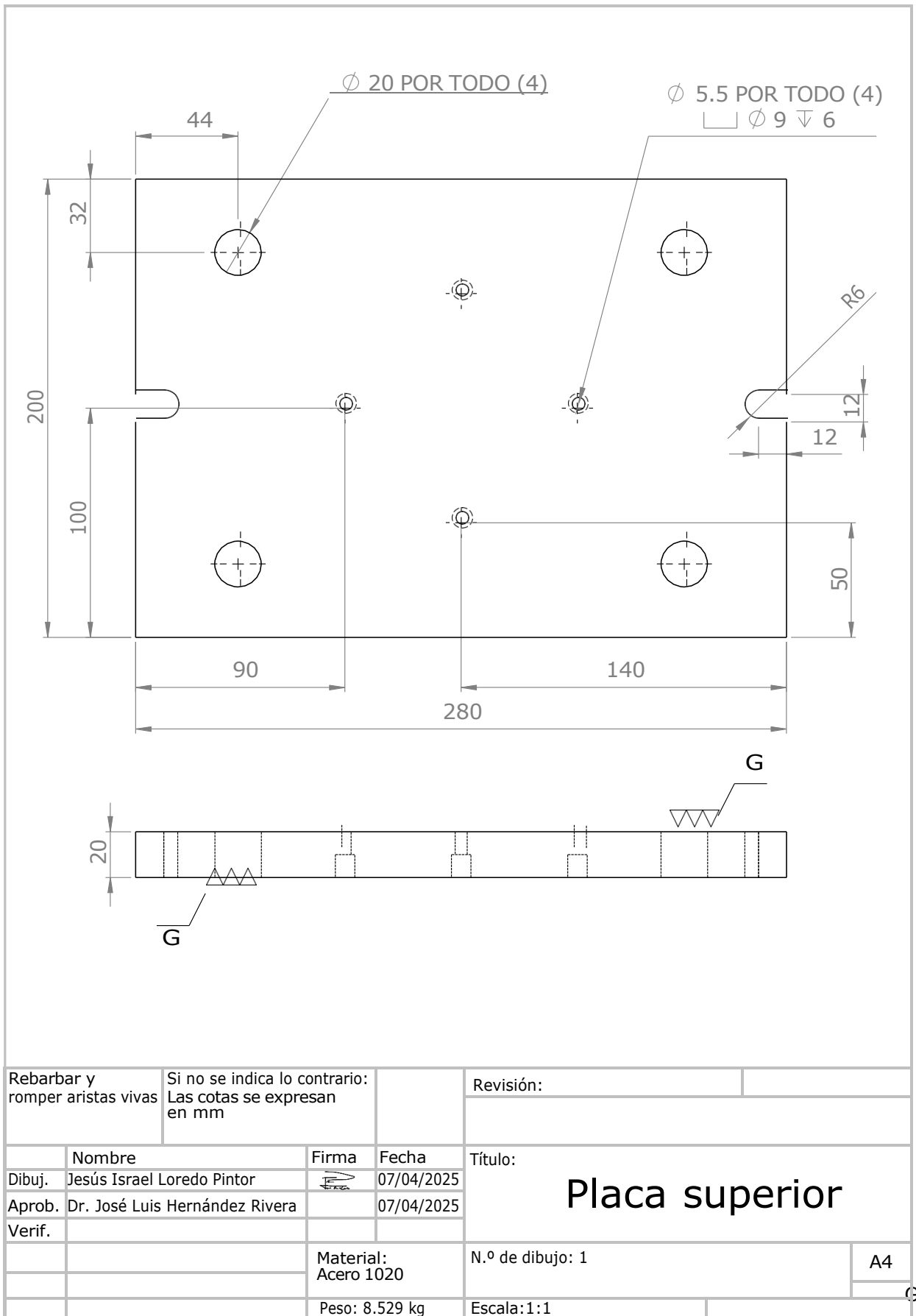


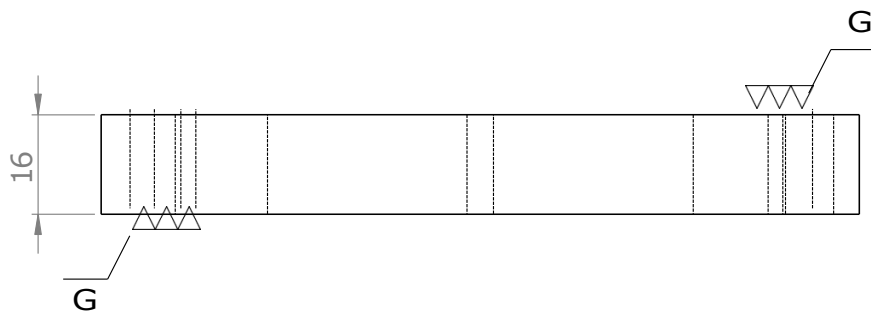
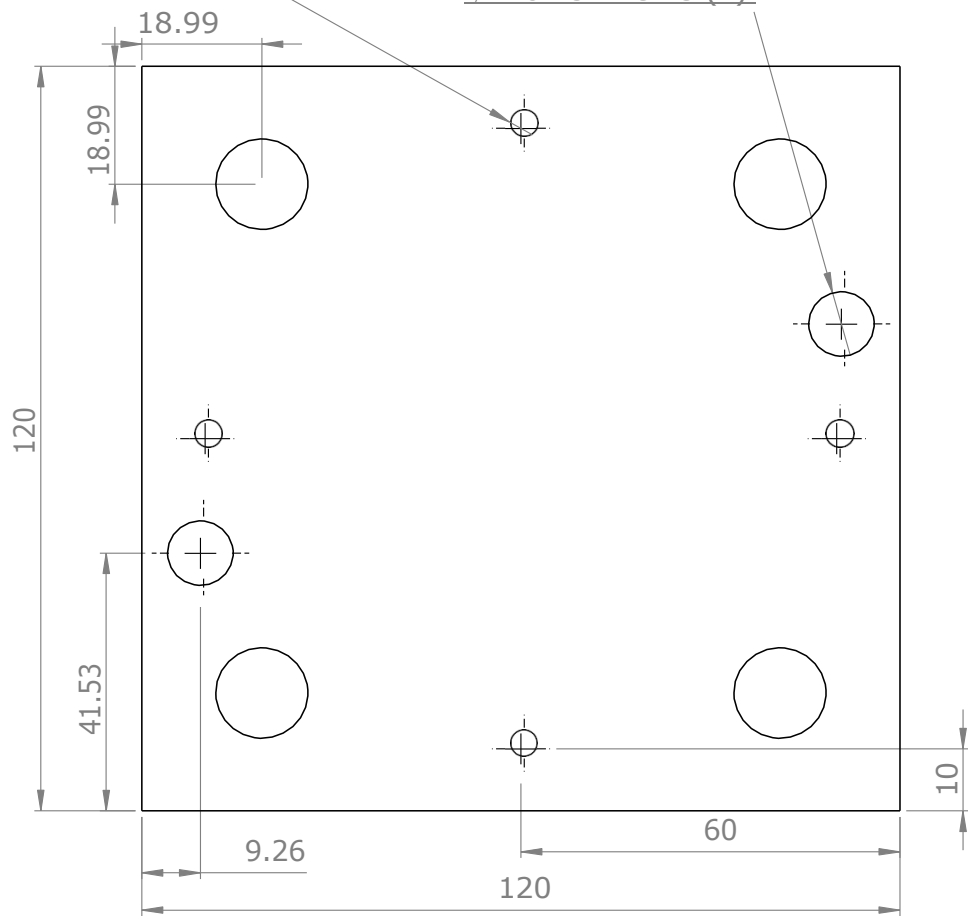
Figura Anexo 1.10. Eliminación de cajas para tornillos alineadores.

Anexo 2. Planos de las piezas diseñadas y maquinadas.

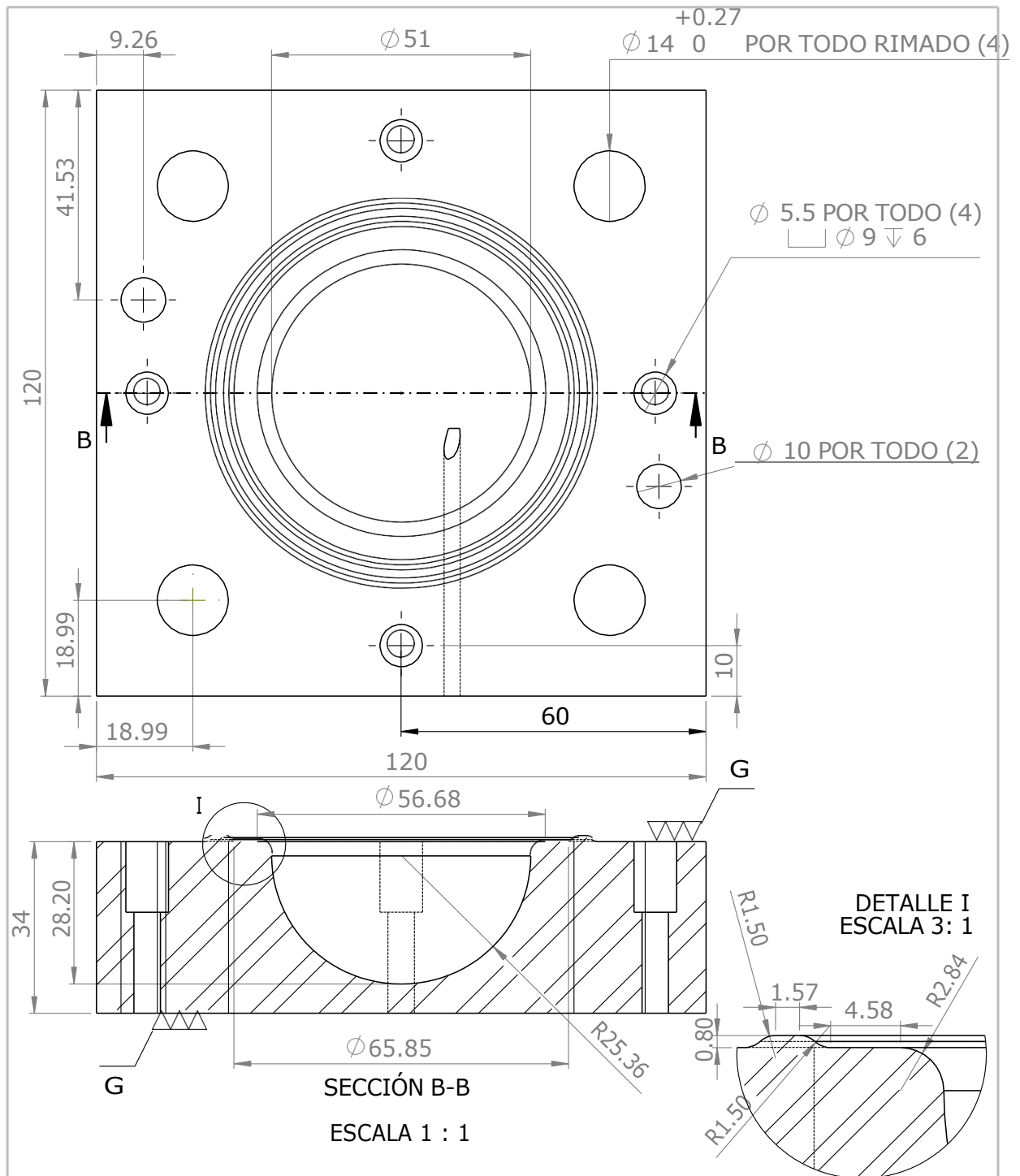


M5-0.8 x POR TODO (4)

Ø 10 POR TODO (2)

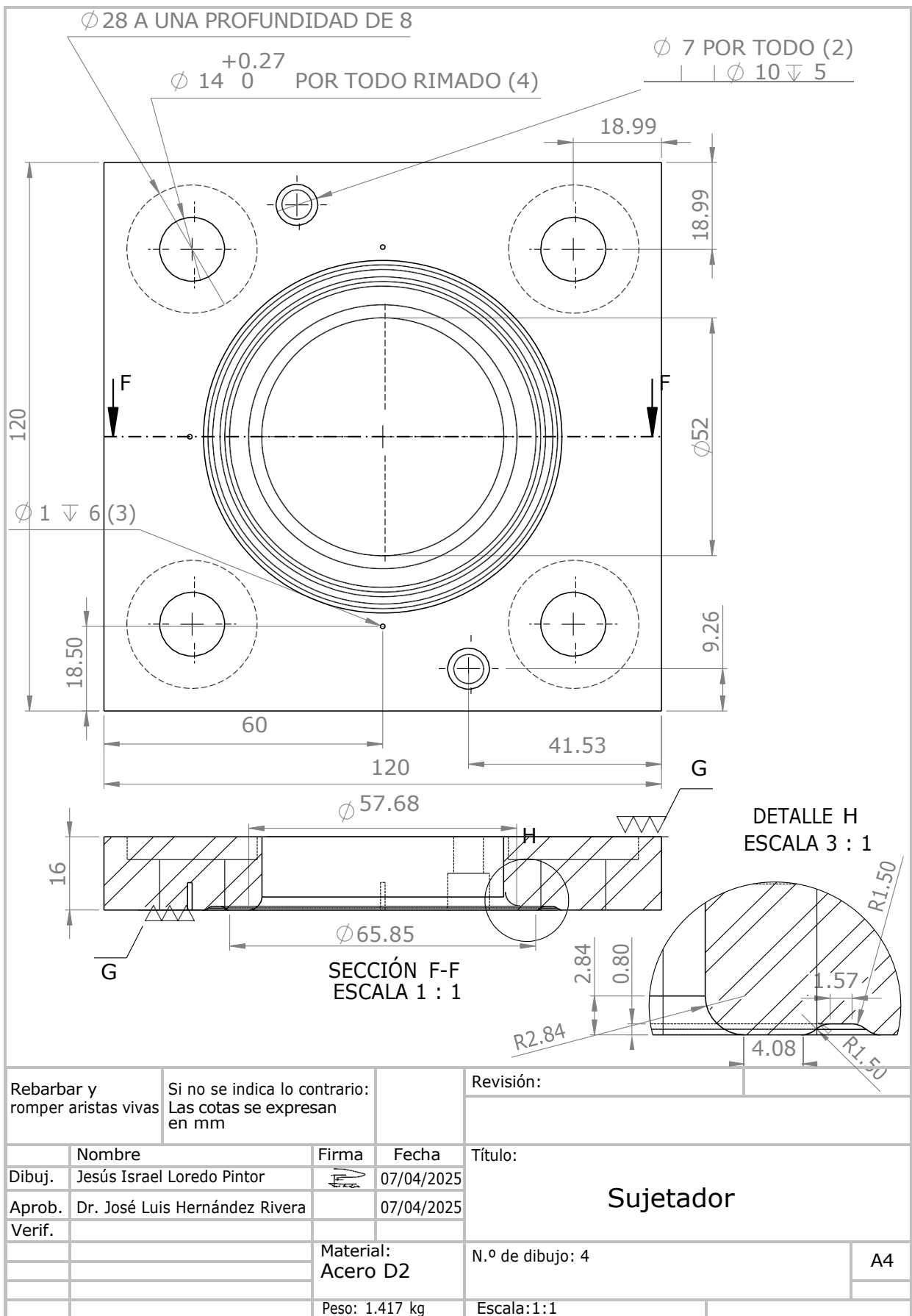


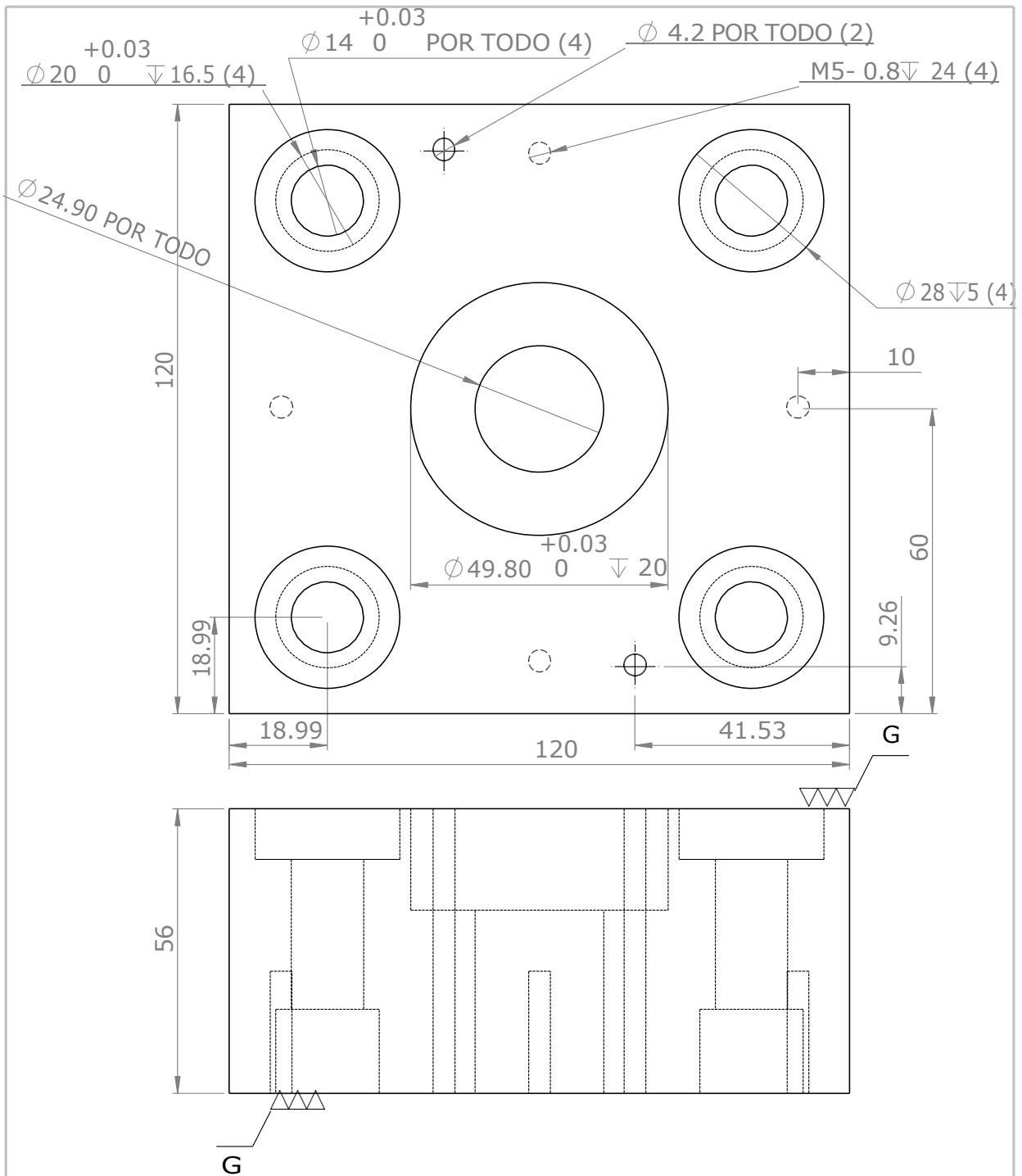
Rebarbar y romper aristas vivas		Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm		Revisión	
Nombre		Firma	Fecha	Dr. José Luis Hernández Rivera	
Dibuj.	Jesús Israel Loredó Pintor		07/04/2025	Título: Espaciador superior	
Aprob.	Dr. José Luis Hernández Rivera		07/04/2025		
Verif.					
		Material: Acero 4140		N.º de dibujo: 2	
		Peso: 1.787 kg		Escala: 1:1	
				A4	



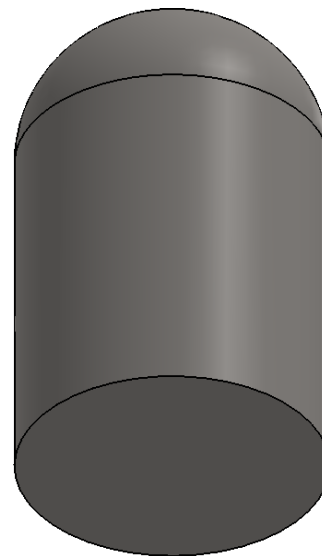
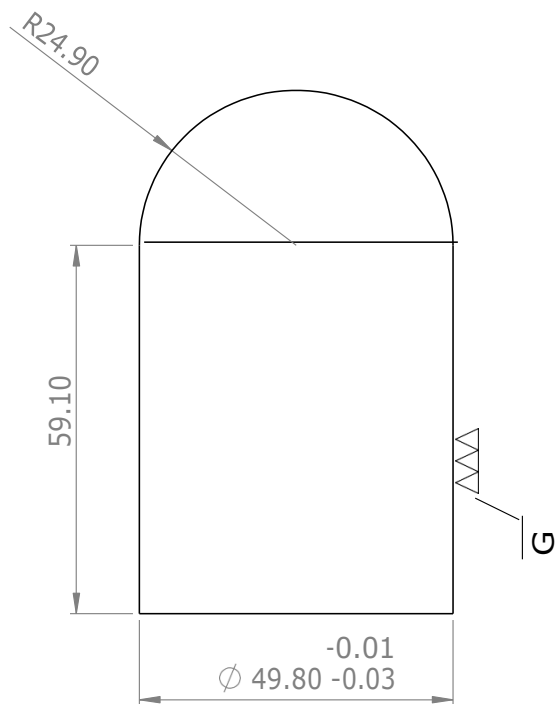
Rebarbar y romper aristas vivas		Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm		Revisión:	
Nombre		Firma		Título:	
Dibuj.	Jesús Israel Loredó Pintor	Firma		Fecha	
Aprob.	Dr. José Luis Hernández Rivera	Firma		Fecha	
Verif.		Firma		Fecha	
		Material: Acero D2		N.º de dibujo: 3	
		Peso: 3.274 kg		Escala 1:2	
				A4	

Dado Superior

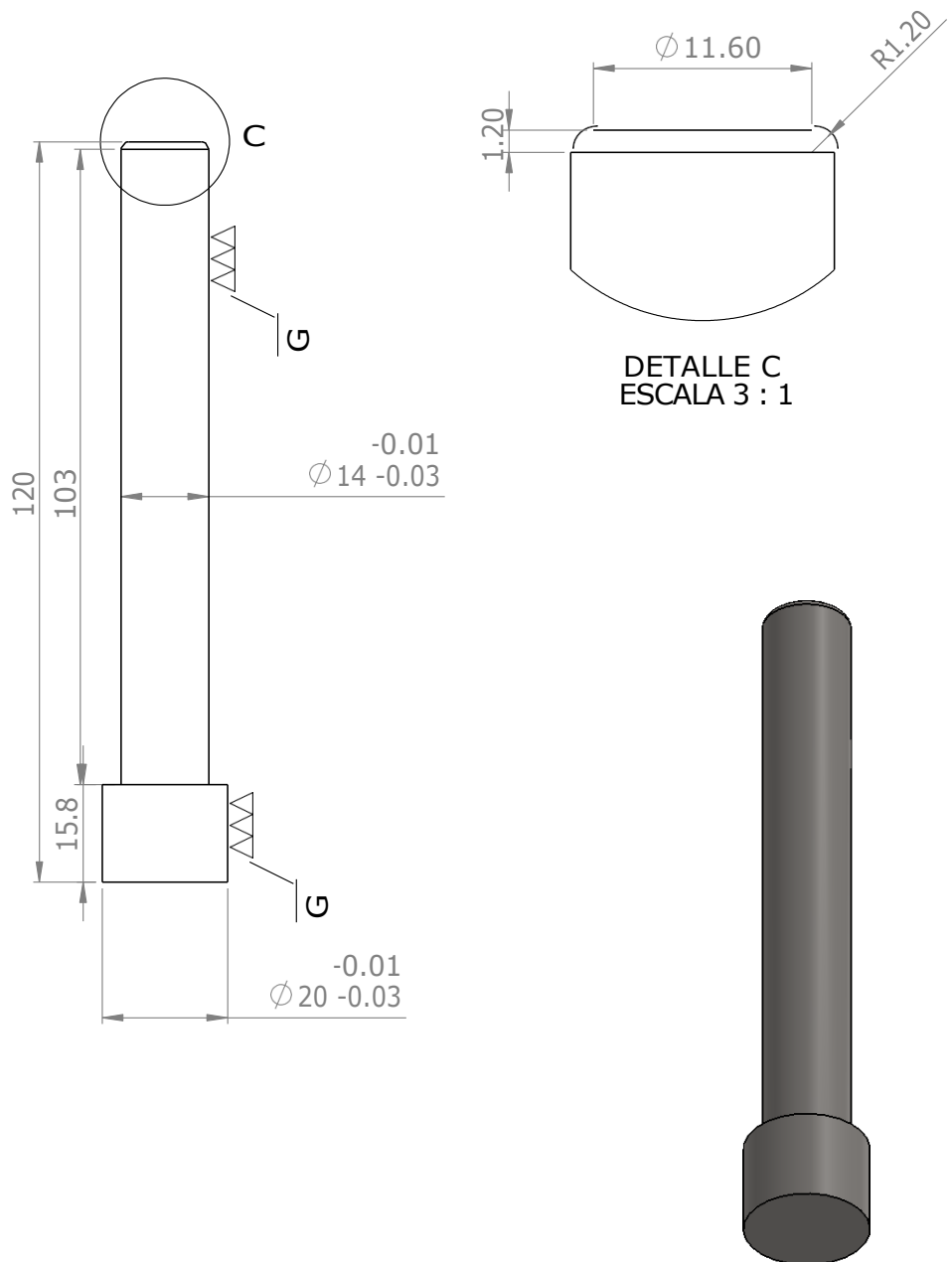




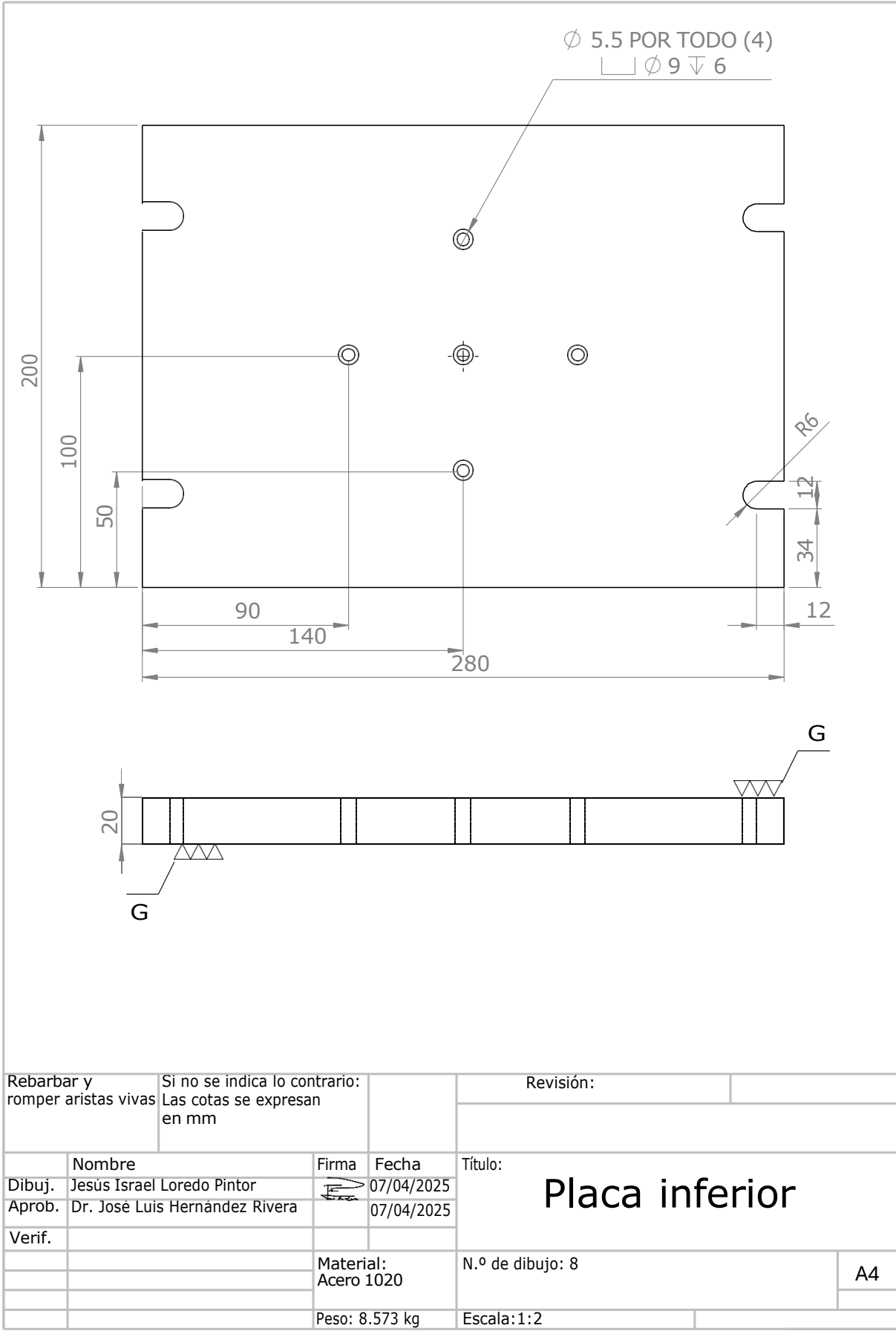
Rebarbar y romper aristas vivas		Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm		Revisión:	
	Nombre	Firma	Fecha	Título:	
Dibuj.	Jesús Israel Loredo Pintor		07/04/2025	Dado inferior	
Aprob.	Dr. José Luis Hernández Rivera		07/04/2025		
Verif.					
		Material: Acero D2		N.º de dibujo: 5	A4
		Peso: 8.807 kg		Escala:1:2	



Rebarbar y romper aristas vivas		Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm		Revisión:	
	Nombre	Firma	Fecha	Título: Punzón	
Dibuj.	Jesús Israel Loredó Pintor		07/04/2025		
Aprob.	Dr. José Luis Hernández Rivera		07/04/2025		
Verif.					
		Material: Acero D2		N.º de dibujo: 6	A4
		Peso: 1.052 kg		Escala: 1:1	



Rebarbar y romper aristas vivas		Si no se indica lo contrario: Las cotas se expresan en mm		Revisión:	
	Nombre	Firma	Fecha	Título: Poste Guía	
Dibuj.	Jesús Israel Loredo Pintor		07/04/2025		
Aprob.	Dr. José Luis Hernández Rivera		07/04/2025		
Verif.					
		Material: Acero D2		N.ºde dibujo: 7	
				A4	
		Peso: 141 g		Escala: 1:1	



Anexo 3. Operaciones de maquinado.

La Figura Anexo 3.1 muestra el estado inicial de las barras y bloques de acero con las que fueron fabricadas las piezas del troquel. En la fresadora fueron reducidas las dimensiones de los bloques ajustando lo más aproximado al tamaño mostrado en los planos, Figura Anexo 3.2.



Figura Anexo 3.1. Barras y bloques de acero en estado inicial utilizadas para las piezas.



Figura Anexo 3.2. Operación de reducción de espesor en la fresadora.

En la rectificadora, Figura Anexo 3.3, se les dio la dimensión exacta a las piezas fabricadas a partir de los bloques (placas superior e inferior, dado superior, espaciadores superior e inferior y sujetador). Además, de darles el acabado superficial necesario.



Figura Anexo 3.3. Operación de acabado superficial en rectificadora.

En el taladro de banco, Figura Anexo 3.4, se hicieron los orificios para los tornillos sobre las placas, sujetador y espaciador inferior. También, sobre el dado, espaciador inferior y sujetador se hicieron los orificios que permiten el paso de los postes guías. Se utilizó una rima de 14 mm para dar el diámetro exacto que tienen dichos postes.

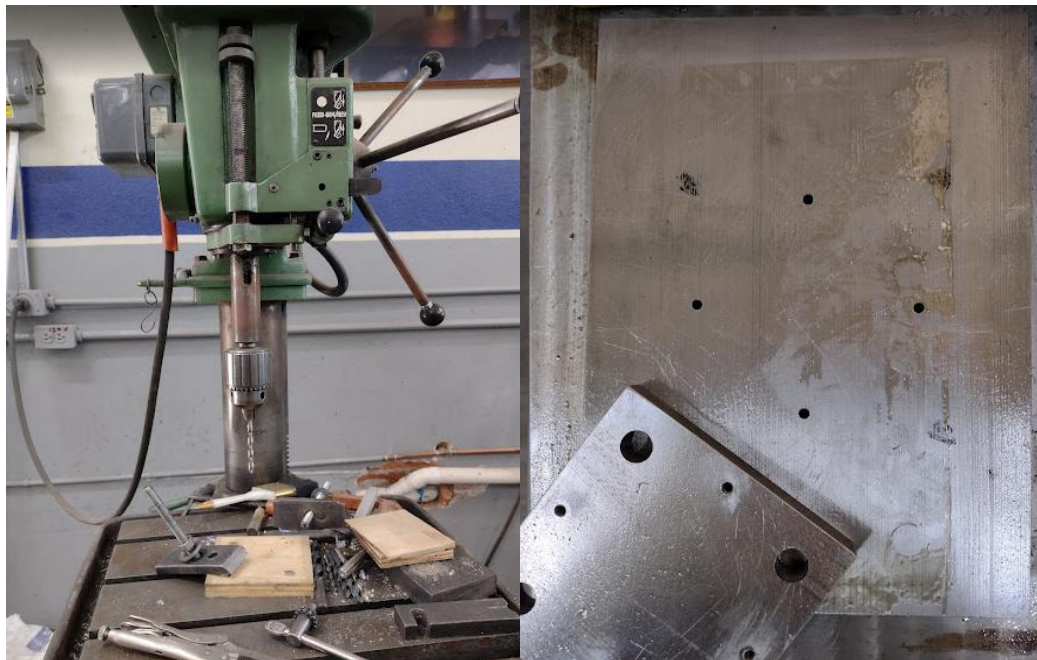


Figura Anexo 3.4. Operación de taladrado en el tornillo de banco.

Se hizo la rosca en los espaciadores con un machuelo, para que los tornillos sujeten las piezas, Figura Anexo 3.5.

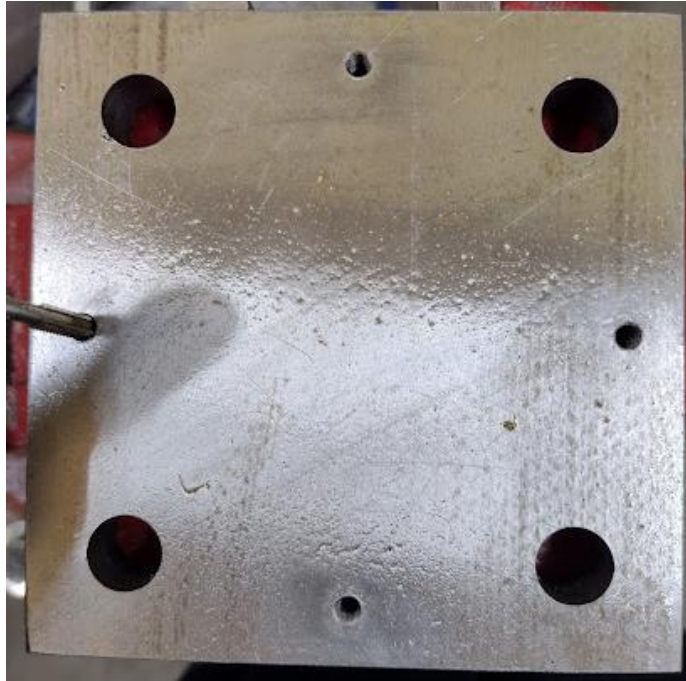


Figura Anexo 3.5. Operación de roscado sobre los espaciadores.

En el espaciador inferior y sujetador, se maquinaron los orificios de las cajas de los resortes en el torno, además, del orificio donde va colocado el punzón en el espaciador inferior, Figura Anexo 3.6. En el mismo equipo sobre el dado, fue realizada la ranura de sujeción, el espació y radio de entrada al dado; sobre el sujetador se realizó la contraparte de la ranura, y el orificio para que, entre el punzón, Figura Anexo 3.7.

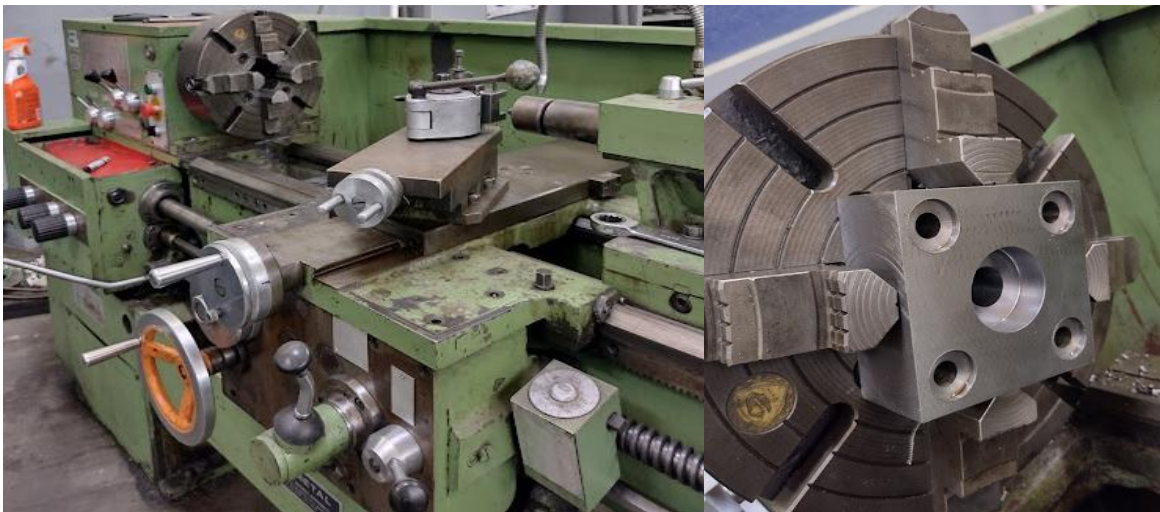


Figura Anexo 3.6. Operación de maquinado de cajas, ranura y orificios para punzón en el torno.

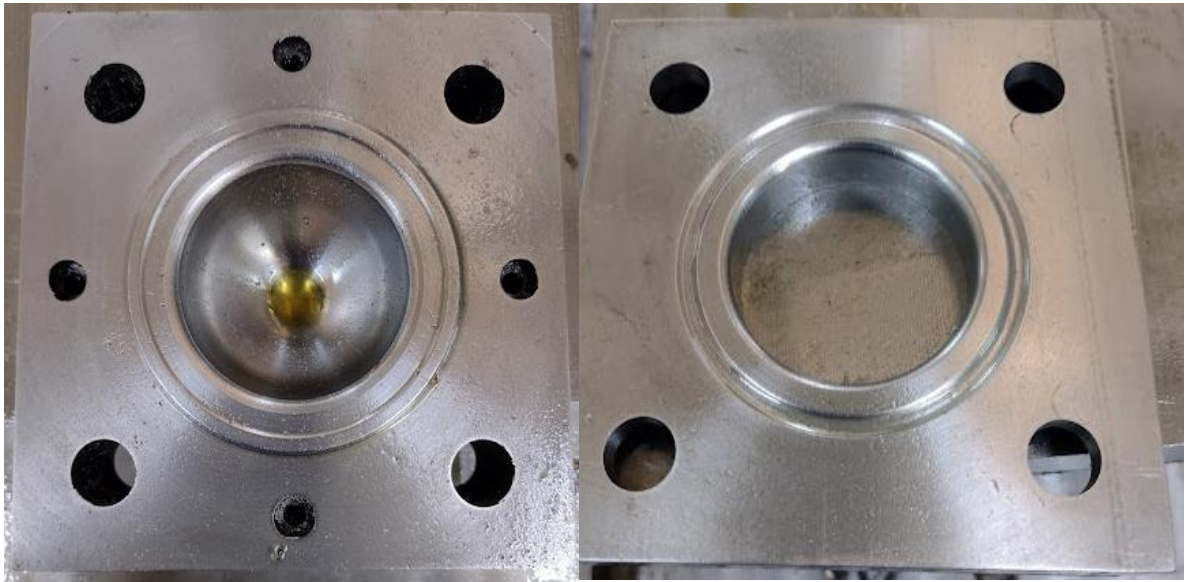


Figura Anexo 3.7. Ranura y contra ranura en el dado y sujetador.

Para los postes guías, se cortaron 4 partes de la barra de 1 pulgada. En el torno, en una primera operación fueron aproximadas a las dimensiones de espesor y longitud, para después darles un acabado superficial, Figura Anexo 3.8. La barra de 2.25 pulgadas utilizada para el punzón, se cortó en la cortadora aproximando la longitud de la pieza, Figura Anexo 3.9. Posteriormente en el torno se le dieron las dimensiones finales y se hizo el radio del punzón.



Figura Anexo 3.8. Reducción de dimensiones de las barras en el torno.



Figura Anexo 3.9. Cortadora utilizada para cortar la barra de 2.25 pulgadas.

Anexo 4. Análisis económico del maquinado y uso del programa de simulación.

La Tabla Anexo 4.1 muestra las horas utilizadas por el programa para llevar a cabo las simulaciones. No se muestra el tiempo de creación del modelo numérico, sino el tiempo que toma el programa en realizar todos los pasos de simulación.

Tabla Anexo 4.1. Horas invertidas de simulación para la sujeción y prueba de Nakazima.

Proceso.	Horas.
Sujeción	128
Prueba	578.5
Total	706.5

En la Tabla Anexo 4.2 se muestran las horas necesarias invertidas en el taller de maquinado para realizar las operaciones mencionadas en el anexo anterior para realizar cada una de las piezas del troquel.

Tabla Anexo 4.2. Horas invertidas para el maquinado de cada pieza del troquel.

Pieza	Horas de maquinado
Placa superior	47
Placa inferior	45
Calza superior	45
Calza inferior	45
Punzón	8
Postes guías	20
Espaciador inferior	50
Sujetador	40
Espaciador superior	42
Dado superior	55
Total	397

Se imprimieron las piezas del herramental después del análisis del funcionamiento, algunas piezas fueron impresas más de una ocasión debido a los cambios mencionados anteriormente. Fue importante visualizar las piezas en físico antes del maquinado para evitar errores en el metal. El tiempo de impresión tomado por la impresora 3D se muestra en la Tabla Anexo 4.3, para cada una de las piezas impresas y la diferente cantidad.

Tabla Anexo 4.3. Horas tomadas por el equipo de impresión 3D.

Pieza	Cantidad de piezas impresas	Horas
Placa superior	1	12
Espaciador	3	4
Dado superior	3	25
Sujetador	3	15
Espaciador inferior	3	30
Punzón	2	8
Postes	4	8
Placa inferior	1	12
Total		114

En la Tabla Anexo 4.4 se muestra un análisis económico de las herramientas y técnicas utilizadas para realizar el trabajo de tesis. Se encontraron distintos precios de horas de maquinado, simulación e impresión 3D, fueron tomados valores promedio entre los valores mayores y menores, resultando en un total de inversión de aproximadamente \$280,000. Es importante mencionar que es una inversión necesaria durante un cambio de material en un proceso de formado o al arranque de una operación, para evitar problemas y pérdidas económicas mayores, de esta manera se puede comprobar que el material es indicado para la pieza de trabajo. En esta cantidad no es tomado en cuenta el costo de las piezas de acero para realizar el troquel, ni otras herramientas como el uso del *software* de dibujo técnico.

Tabla Anexo 4.4. Inversión económica por las horas de las herramientas utilizadas.

Herramienta.	Horas invertidas.	Inversión económica (\$ MXN).
Maquinado [61].	397	99, 250
Programa <i>DEFORM-3D</i> [62].	706.5	173,972
Impresión 3D [63].	114	4,925
	Total	\$278, 147

Referencias.

- [1] Zheng, K., Politis, D. J., Wang, L., & Lin, J. (2018). A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminum panel components. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(2), 55–80.
- [2] Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vieregge, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49.
- [3] Kumar, N., & Dixit, U. S. (2017). Friction stir welding of aerospace materials: A state-of-the-art review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, 231(6), 1163-1176.
- [4] Castro Patiño, L. F. (2014). Aleaciones de aluminio y su importancia en la industria aeroespacial. *MetalActual*, 31, 12–16.
- [5] Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. ASM International.
- [6] Mukhopadhyay, P. (2012). Alloy designation, processing, and use of AA6XXX series aluminum alloys. *International Scholarly Research Notices*, 165082, 1–15.
- [7] Ozdogru, E. F. (2024). The effect of chemical composition on EN AW 6XXX series aluminum alloys. In *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. IntechOpen.
- [8] Hydro Extrusion. (2023). Aluminium alloy 6082-T6. Retrieved November 6, 2023. Consultado el 25 de agosto del 2025 de <https://www.hydro.com/en/global/aluminium/products/extruded-profiles/alloys-for-extruded-profiles/6082-alloy/>
- [9] Holmestad, R., Marioara, D., Ehlers, J. H., et al. (2010). Precipitation in 6xxx aluminum alloys. In *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys* (pp. 30-39). The Japan Institute of Light Metals.
- [10] Maisonnnette, D., Suery, M., Nelias, D., Chaudet, P., & Epicier, T. (2011). Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061-aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 528(6), 2718–2724.
- [11] Edwards, G. A., Stiller, K., Dunlop, G. L., & Couper, M. J. (1998). The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. *Acta Materialia*, 46(11), 3893–3904.
- [12] Yang, L., Bai, D., Wang, D., Liu, C., Yang, S., & Huang, G. (2023). Effect of aging temperature on microstructure and corrosion behavior of 6082 aluminum alloy. *Materials Today Communications*, 36, 106583.
- [13] MatWeb. (2025, julio 7). MatWeb material property data. Consultado el 7 de julio del 2025 de <https://www.matweb.com/>
- [14] Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura* (3.^a ed., pp.418-423). McGraw Hill.

- [15] Hendrick, A. (2015). Die Science: Drawing and stretching. What difference does it make to know the difference? *Stamping Journal*, 27(4), 14–15.
- [16] Heimbs, S., & Schmeer, S. (2019). Automotive Body Manufacturing Processes and Materials. In *Encyclopedia of Automotive Engineering*. Wiley.
- [17] Metallurgy for Dummies. (2024, junio 27). Consultado el 27 de junio del 2024 de <https://www.metallurgyfordummies.com/deep-drawing.html>
- [18] Suchy, I. (2006). *Handbook of die design* (2.^a ed., 95-102). McGraw-Hill Handbooks.
- [19] Berruti, A. (1964). *Stampi e presse* (4.^a ed.). S. Lattes & C. Editori.
- [20] Oehler, G. (1977). *Herramientas de troquelar, estampar y embutir* (6.^a ed.).
- [21] Banabic, D., Bunge, J., Pohlandt, K., & Tekkaya, A. E. (2000). Formability of metallic materials. In *Springer-Verlag Berlin Heidelberg* (pp. 173–191).
- [22] Abspoel, M., Scholting, M., & Droog, J. (2013). A new method for predicting forming limit curves from mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 759–769.
- [23] Surajit, P. K. (2021). Controlling factors of forming limit curve: A review. *Advances in Industries and Manufacturing Engineering*, 2, 2–7.
- [24] Smith, D. A. (1990). Die Design Handbook (3.^a ed., pp.397-399). Society of Manufacturing Engineers.
- [25] Manufactura.mx. (2024, junio 27). 2013, el año de la proveeduría. Consultado el 27 de junio del 2024 de <https://manufactura.mx/industria/2013/02/06/2013-el-ano-de-la-proveedoria>
- [26] Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., & Okada, T. (2009). Design of ship hull structures. Springer, 125-127.
- [27] Pranavi, U., et al. (2016). Formability analysis of aluminum alloys through deep drawing process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 149, 012025.
- [28] Altair Engineering, Inc. (2020). *BMW Group relies on Altair solutions for lightweight vehicle design*. Consultado el 25 de agosto del 2025 de <https://altair.com/customer-story/bmw-emulating-engineering-expertise-with-ai>
- [29] Airbus S.A.S. (2023). *Digital design, manufacturing and services (DDMS)*. Airbus. Consultado el 24 de agosto del 2025 de <https://www.airbus.com/en/innovation/digital-transformation/digital-design-manufacturing-services>
- [30] Brun, R., Chambard, A., Lai, M., & De Luca, P. (1999). Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials. In *Proceedings of NUMISHEET'99. Besançon, France*, 393-398.

- [31] Geiger, M., & Merklein, M. (2003). Determination of forming limit diagrams: A new analysis method for characterization of materials formability. *Annals of the CIRP*, 52, 213–216.
- [32] Lumelskyj, D., Rojek, J., Lazarescu, L., & Banabic, D. (2019). Determination of forming limit curve by finite element method simulations. *Procedia Manufacturing*, 27, 78–82.
- [33] Volk, W., & Hora, P. (2011). New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination. *International Journal of Material Forming*, 4(3), 339–346.
- [34] Situ, Q., Jain, M., & Bruhis, M. (2006). A suitable criterion for precise determination of incipient necking in sheet materials. *Materials Science Forum*, 519–521, 111–116.
- [35] Safari, M., Hosseinipour, S. J., & Azodi, H. D. (2011). Experimental and numerical analysis of forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD). *Materials Sciences and Applications*, 2, 497–503.
- [36] Cockcroft, M. G., & Latham, D. J. (1968). Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals*, 96, 33–39.
- [37] Mahboubkhah, M. (2013). Determination of the forming limit diagrams by using the FEM and experimental method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(5), 1437–1442.
- [38] Rath, S. (2016). Computer simulation of hot rolling of flat products. *Software Engineering*, 4(6), 75–81.
- [39] Huang, H., Deng, J., Diao, P., & Hu, X. (2011). Numerical simulation of aluminum alloy hot rolling using DEFORM-3D. In *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering* (pp. 378–381). Shanghai, China.
- [40] Shanker, P., Kumar P. and Kumar K. (2017). Sheet Metal Forming of Interstitial-Free Steel and Extra-Deep-Drawing Steel Using ABACUS. *Advanced Materials Manufacturing & Characterization* Vol. 7 Issue 2. (pp. 66-72).
- [41] ASTM International. (2021). Standard specification for aluminum and aluminum-alloy sheet and plate (Standard No. B209). ASTM International.
- [42] Goldstein, J., Mewbury, D., et al. (2003). *Scanning electron microscopy and X ray microanalysis* (3.^a ed., cap. 3). Springer.
- [43] Khorsand, S., & Huang, Y. (2017). Integrated casting-extrusion (ICE) of an AA6082 aluminium alloy. En Light Metals. *The Minerals, Metals & Materials Series* (pp. 235–241).
- [44] ASTM International. (1985). ASTM E8-85. Método de ensayo estándar para pruebas de tensión de metales. ASTM.

- [45] ASTM International. (2002). ASTM E2218-02. Método de ensayo estándar para determinar las curvas límite de formado. ASTM.
- [46] González, A. C., Cruz Rivera, J. J., Ramos Azpeitia, M. O., Garnica-González, P., Garay Reyes, C. G., Pacheco Cedeño, J. S., & Hernández Rivera, J. L. (2021). 3D-FEM simulation of hot rolling process and characterization of the resultant microstructure of a light-weight Mn steel. *Crystals*, 11(5), 569.
- [47] AutoForm. (2020). Volkswagen relies on AutoForm for the virtual validation of sheet metal forming processes. Consultado el 24 de Agosto del 2025 de https://www.autoform.com/fileadmin/public/Redaktion/en/newsroom/news/2016/PressRelease_161027.pdf
- [48] Li, Q., Qin, J., Jiang, D., Yi, D., & Wang, B. (2022). Precipitate coarsening and mechanical properties in 6082 aluminium alloy during long-term thermal exposure. *Journal of Alloys and Compounds*, 909, 164819.
- [49] The International Centre for Diffraction Data. (2022). PDF-2 Release.
- [50] Safdarian, R. (2018). Forming limit diagram prediction of 6061 aluminum by GTN damage model. *Mechanics & Industry*, 19(2), 202.
- [51] Wan, M., & Wu, X. (2017). Prediction of forming limit curves for 2021 aluminum alloy. *Procedia Engineering*, 207, 544–549.
- [52] Habeeb, A. H., Abed, A. H., & Singal, A. H. (2024). Numerical analysis of the effect of coefficient of friction on the formability behaviour of aluminium AA1060 in the stretch-forming process. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, 3, 868.
- [53] Cavusoglu, O., & Surucu, H. (2020). Thickness dependent yielding behavior and formability of AA6082-T6 alloy: Experimental observation and modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 4083–4091.
- [54] Kumar, R. L., Arundeeep, G., Goud, R., & Reddy, C. V. (2023). Construction of formability limit diagram of aluminium alloy-6082 at the ambient temperature. *AIP Conference Proceedings*, 2869(1), 020003.
- [55] Heidari, A., Ghassemi, A., & Atrian, A. (2018). Numerical and experimental investigation of forming limit diagrams of 6063 aluminum alloy sheets using Ayada ductile

fracture criterion and the second derivative of large strain criterion at increased temperatures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(9), e108.

[56] Sharma, M. K., & Mukhopadhyay, J. (2015). Evaluation of forming limit diagram of aluminum alloy 6061-T6 at ambient temperature. En M. Hyland (Ed.), *Light Metals* 2015. Springer.

[57] DiCecco, S., et al. (2016). Determination of forming limit diagrams of AA6013-T6 aluminum alloy sheet using a time and position dependent localized necking criterion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 159, 012009.

[58] Tafti, M. F., Sedighi, M., & Hashemi, R. (2018). Effects of natural ageing treatment on mechanical, microstructural and forming properties of Al 2024 aluminum alloy sheets. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 15(4).

[59] Barlat, F., & Vasudevan, A. K. (1991). Influence of precipitate microstructure on flow and forming properties of an aluminum alloy sheet. *Acta Metallurgica et Materialia*, 39(3), 391–400.

[60] Narayasamy, R. (2015). Formability and wrinkling limit diagrams and their analysis of high strength IF, dual phase, HSLA and other steels sheets supplied by M/s. Narayana National Institute of Technology.

[61] Deburring Technologies. (s.f.). Job costing for CNC machining centers: Challenges and opportunities. (2025, mayo 11) Consultado el 11 de mayo del 2025 de <https://deburringtechnologies.com/job-costing-for-cnc-machining-centers-challenges-and-opportunities/>

[62] Siemens. (s.f.). Compare Process Simulate and Process Simulate X software. (2025, mayo 11). Consultado el 11 de mayo del 2025 de <https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/products/compare-process-simulate-x-software/>

[63] Eufy Make. (s.f.). How much do 3D prints cost? Impresora 3D México. (2025, mayo 11). Consultado el 11 de mayo del 2025 de <https://www.eufymake.com/ca/blogs/buying-guides/how-much-do-3d-prints-cost>