



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – METALMECÁNICA

DISEÑO Y MANUFACTURA DE TROQUEL DE EMBUTIDO Y ANÁLISIS
EXPERIMENTAL DEL PROCESO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

IVÁN ALBERTO ESPINOSA ALDANA

TUTOR

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ENERO 2019

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. BARBA PINGARRÓN ARTURO
Secretario: DR. JACOBO ARMENDARIZ VÍCTOR HUGO
1er. Vocal: DR. ORTIZ PRADO ARMANDO
1do. Vocal: DR. ESPINOSA BAUTISTA ADRIÁN
3er. Vocal: DR. MORALES ACOSTA LÁZARO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. ORTIZ PRADO ARMANDO

FIRMA

Agradecimientos

Es obligación moral de todo estudiante al concluir este tipo de proyectos agradecer a las personas organismos públicos y agrupaciones que de manera directa o indirecta apoyaron durante un largo proceso, que sin ellos, en muchos casos no sería posible. Es por ello que en esta corta pero importante sección agradezco al CONACYT por haberme dado la oportunidad de estudiar becado y de tiempo completo durante el proceso de mis estudios en la maestría.

A mi tutor el Dr. Armando Ortiz Prado le doy las gracias por las recomendaciones realizadas, aportaciones académicas y de vida, consejos e incondicional apoyo.

Al M.I Efraín Ramos Trejo por su siempre incondicional disponibilidad para el uso de la máquina de ensayos universal y la mesa de coordenadas, las cuales me ayudaron a no prolongar más mi investigación.

A mis padres Paz Aldana Arara y Alberto Espinosa Barrera; les doy infinitas gracias por siempre inculcarme buenos valores. Agradezco por siempre dar su mayor esfuerzo para darme lo mejor incluyendo la mejor herencia: estudiar y hacer de mí la persona que soy ahora.

A Mariana Segura Galván que durante mi proceso de titulación de licenciatura y durante todo mi proceso de maestría, fue quien en todo momento me ayudo, confió en mí, me dio consejos y me motivo a no dejarme vencer por las adversidades que a veces la vida nos presenta. A ella infinitas gracias, por motivarme a siempre ser una mejor persona, y contribuir a mi crecimiento intelectual y social.

A Rafael Segura Pérez, por su apoyo en la toma de fotografías y edición de imágenes. Le agradezco que en cada conversación me aporto algo, por cambiar radicalmente mi forma de pensar y enseñarme a ver y valorar las cosas que nunca quise valorar.

A los técnicos del taller de ingeniería mecánica: Cuitláhuac Paredes Valverde y Miguel Ángel García Quijas que más que un apoyo durante el proceso de manufactura, grandes consejos y motivación en momentos de frustración, se convirtieron en compañeros de trabajo y unos grandes amigos.

A todos los mencionados y quien me faltó mencionar pero que saben que siempre estuvieron ahí; ¡MUCHAS GRACIAS!

Prólogo

El sector metalmecánico es un factor importante dentro del comercio mexicano, en 2017 el aporte de la industria metalmecánica fue del 5.1% en el comercio exterior y se estima un crecimiento del 4% en 2018 según (Datos abiertos de México, 2018), debido a que se espera inversión extranjera en la industria aeroespacial y automotriz. Todos estos factores exigen que México abra campos de investigación y genere profesionales especialistas en el sector metalmecánico para cumplir con las necesidades del mercado.

Actualmente existe una gran variedad de productos fabricados a través de hojas metálicas, entre los que podemos encontrar objetos de uso cotidiano e industrial, como lo son latas para bebidas, artículos de cocina, carrocerías de automóviles, etc. Las hojas metálicas ofrecen ventajas por su ligereza y versatilidad, un proceso muy importante para la transformación de dichas hojas metálicas es el embutido. El embutido es un proceso sumamente utilizado a nivel industrial por su rapidez y bajo costo en altos volúmenes.

Actualmente en las industrias es común encontrar que se trabaja con parámetros de embutido poco adecuados, debido a que no se realizan estudios con la profundidad necesaria y los procesos son diseñados a través de experimentación sin sustento en una investigación. Lo cual tiene como consecuencia procesos con bajas eficiencias y con un sobrecosto.

El objetivo principal de este trabajo es sentar un precedente en donde se guía al lector desde el diseño y manufactura de los herramientas para realizar ensayos *Erichsen*, hasta el procesamiento de datos y análisis de resultados. Para de esta forma obtener la capacidad de embutido de los materiales.

El presente trabajo se compone de 4 capítulos. En el capítulo 1 se presenta una introducción al proceso de troquelado, así como los componentes básicos en los herramientas, haciendo énfasis en los procesos corte y de embutido. Se podrá encontrar también una investigación realizada con anterioridad acerca de medición de fuerzas de corte en un proceso de troquelado, el cual es homologo a la

investigación medular de este trabajo debido a que se sigue la misma metodología.

En el capítulo 2 se presenta la metodología propuesta para el proceso diseño de los herramientas, que abarca desde la configuración seleccionada, la selección de materiales y selección de procesos de manufactura. Se describe detalladamente los procesos de manufactura utilizados, así como también; como garantizar la alineación de los componentes a través del uso de máquinas-herramientas convencionales.

Adicionalmente se presenta la caracterización de 4 diferentes láminas de trabajo para la obtención de las propiedades y la cuantificación de la anisotropía en cada una de ellas. Las cuatro muestras de lámina son del mismo material, pero se varían las condiciones, con dos espesores diferentes, y un tratamiento térmico de recocido, teniendo un total de 4 condiciones diferentes para un análisis de las diferentes variables presentes en el proceso.

En el capítulo 3 es presentado el análisis de los resultados de las diferentes mediciones y cálculos realizados, como lo son las fuerzas de embutido, el cálculo de las anisotropías de los materiales, la medición de las copas al final del proceso y finalmente los efectos que se dieron como consecuencia del tratamiento de recocido en la lámina.

Finalmente se presentan las conclusiones en el último apartado de este escrito, en el cual se discute el beneficio de la configuración seleccionada. El efecto del tratamiento térmico de recocido en el material de trabajo y la justificación de los resultados.

Objetivos

Diseñar y manufacturar un troquel de embutido para la implementación de ensayos *Erichsen* que cumpla con la norma *DIN EN 1669*, apto para medir la capacidad de embutido de los materiales. Adicionalmente se busca que sea fácilmente adaptable a prensas mecánicas y máquinas de ensayos universales.

Definir las propiedades mecánicas y capacidad de embutido de las cuatro condiciones de prueba, para así poder determinar que influencia tiene el tratamiento térmico y el calibre de la lámina dentro del proceso.

Sentar un precedente para que la industria sea capaz de manufacturar sus propios herramientas e implementar el ensayo *Erichsen*, así como también poder procesar los datos obtenidos para concluir cuales son los materiales que tienen mayor capacidad de embutido.

Hipótesis

Debido a que se va a trabajar con aluminio, un material sumamente dúctil se espera que ninguna de las piezas fracture, y en caso de presentarse dicha fractura se presentará en las piezas que no serán sometidas al tratamiento térmico de recocido, el cual como se expresa en la literatura aumenta la ductilidad hasta en un 50% en este material (*Šlapáková Poková, 2014*), la cual permite una mayor capacidad de embutido.

En este experimento se espera que de las cuatro condiciones de prueba las piezas recocidas sean las que mejor actúen en el embutido, esto podrá ser observable y medible en los defectos presentados en la pieza.

Se espera que la configuración seleccionada en el troquel, nos brinde una fuerza constante en el pisador, al ser un pisador estático.

Índice

Agradecimientos	I
Prólogo	II
Objetivos	IV
Hipótesis	IV
Índice	V
1 Antecedentes	1
1.1 Proceso de troquelado	2
1.2 Componentes básicos de un troquel	3
1.3 Fundamentos de la operación de embutido.	5
1.3.1 Variables del proceso de embutido.....	7
1.3.2 Medidas de anisotropía y capacidad de embutido.....	9
1.3.3 Fuerzas de embutido	13
1.3.4 Ensayo de copa rápida <i>Erichsen (Swift Cup Test)</i>	18
1.3.5 Cálculo de la fuerza del pizador con tornillo de potencia.	21
1.4 Experiencias previas con troqueles	24
1.4.1 Investigación de las fuerza de corte.....	25
1.4.2 Instrumentación de un troquel en una prensa troqueladora.....	26
1.4.3 Caracterización de la lámina de trabajo.....	28
1.4.4 Cálculo de las fuerzas de corte.	30
1.4.5 Medición de las fuerzas de corte.	31
1.4.6 Análisis de resultados	31
1.4.7 Conclusiones del desarrollo del proceso de corte.....	32
2 Metodología y desarrollo del troquel de embutido	33
2.1 Diseño de herramientas para el ensayo <i>Erichsen</i>	35
2.1.1 Cálculo de parámetros del proceso de embutido	37
2.1.2 Diseño CAD.....	38
2.1.3 Selección de materiales.....	39
2.1.4 Manufactura de herramientas.....	40
2.1.5 Centrado de componentes principales.....	43

2.1.6	Tratamiento térmico de punzón y matriz	43
2.1.7	Ensamble con componentes templados.....	44
2.2	Caracterización de la lámina a embutir	45
2.3	Cálculo de la fuerza de embutido	51
2.4	Rango de trabajo de la fuerza del pisador	54
2.5	Análisis de anisotropía y capacidad de embutido en la lámina de trabajo	54
2.6	Implementación del troquel de embutido en una máquina de ensayos universal.....	58
3	Análisis de resultados	59
3.1	Fuerza de embutido.....	59
3.2	Criterio de falla en embutidos.....	60
3.3	Análisis de espesores	61
3.4	Tamaño de “orejas”	62
3.5	Comprobación de experimentación en máquina de ensayos universal.....	64
4	Conclusiones.....	66
	Recomendaciones y trabajos futuros.....	69
	Referencias	70
	Anexos.....	A1
	Diseño de probetas.....	A1
	Dibujos mecánicos de herramientas	B1

1 Antecedentes

Los productos fabricados a partir de chapa metálica se encuentran en el día a día, como una amplia gama de productos o utensilios de uso cotidiano. Por mencionar algunos se tienen las carrocerías de los autos, latas de bebidas y conservas, artículos de cocina, archiveros de oficina, electrodomésticos, monedas que circulan alrededor del mundo todos los días etc. Todos ellos necesitan diferentes procesos para transformar la materia prima a un producto terminado, sin embargo todos los mencionados anteriormente tienen algo en común; todos ellos se producen a partir de un proceso de troquelado.

Existen otros procesos de formado de chapas metálicas como lo son martillado, laminado, estampado, rechazado, estiramiento, todas ofrecen ventajas y desventajas, y dependiendo de la aplicación se habrá de elegir la opción más conveniente. A continuación, se presentará la Tabla 1.1 de ventajas y desventajas del proceso de troquelado.

Tabla 1.1 Tabla de ventajas y desventajas del proceso de troquelado

<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
<i>Alta capacidad de producción</i>	Herramientales y maquinaria cara
<i>Partes con poca o gran profundidad</i>	Formas relativamente simples
<i>Costos de producción bajos</i>	Se pueden originar defectos como: orejado, desgarrado y arrugamiento.
<i>Herramientales y prensas poseen un largo ciclo de vida.</i>	Mucho tiempo para la instalación de herramental debido a que se requiere precisión en la alineación.
<i>Bajos costos de mano de obra</i>	

1.1 Proceso de troquelado

Como definición se puede afirmar que el troquelado es un proceso mecánico de producción industrial que generalmente se utiliza para trabajar en frío lámina metálica y fabricar completa o parcialmente piezas por medio de una herramienta (troquel), formada por un punzón y una matriz principalmente.

Mediante una prensa, el troquel ejerce presión sobre el material, este supera su límite elástico, actuado en su zona plástica y de ser necesario en su punto de ruptura para poder transformar su forma, ya sea para cortar, doblar o conformar una forma previamente definida (*Marín Villar, 2009*).

Es un proceso altamente usado en la industria, ya que una vez generados los herramientas necesarios, se pueden generar piezas en gran volumen de producción a bajo costo.

Los troqueles se pueden clasificar en 2 tipos principalmente: los de corte y los de conformado. Estos a su vez se pueden clasificar según su operación, como se muestra a continuación:

- Troquel de corte:
 - Troquel de cizallado: En estos troqueles se lleva a cabo la operación de corte de una lámina a lo largo de una línea recta entre dos bordes cortantes para reducir grandes láminas a secciones más pequeñas.
 - Troquel de punzonado: En este tipo de troqueles mediante una operación de cizallado se separa una parte de la lámina a lo largo de una línea cerrada, en un solo paso para adquirir la pieza deseada.
- Troquel de conformado:
 - Troquel de embutido: En esta operación lo que se pretende es transformar la lámina en un cuerpo hueco tridimensional en uno o más pasos.
 - Troquel de doblado: Están diseñados para efectuar pliegues en la pieza en bruto. El doblado se define como la deformación del metal alrededor de un eje recto. El metal dentro del plano neutral se

comprime mientras que el metal por fuera del eje neutral se estira. El doblez toma una forma permanente debido a la deformación plástica.

- Troquel de estampado: Estos troqueles son diseñados para deformar plásticamente la lámina y dejarla con ciertas geometrías predeterminadas. Las monedas es un ejemplo claro de un troquel de estampado o acuñado.

Cabe mencionar que todos y cada uno de ellos cuenta con su proceso de diseño, variables específicas del proceso, tolerancias y formas en específico de los herramientas, sin embargo los componentes principales son en esencia los mismos, con la diferencia del claro entre los herramientas, radios, medidas, tolerancias, carrera de la prensa, etc.

1.2 Componentes básicos de un troquel

Como se menciona anteriormente un troquel es una herramienta diseñada a medida de la pieza que se pretende producir y sus componentes principales son muy similares a pesar de las diferentes clasificaciones. A continuación se presenta un troquel de corte, el cual muestra de manera simplificada los componentes principales con los que cuentan todos los troqueles independientemente de la operación que realicen.

Los componentes de trabajo (Figura 1.1) son el punzón y la matriz, los cuales se fijan a las porciones superior e inferior, llamados portapunzón y portamatriz respectivamente. El portamatriz y el portapunzón son placas metálicas también llamadas sufrideras, su función básica consiste en absorber la energía sobre la superficie, por los golpes sucesivos de los elementos en el troquel.

El conjunto incluye también barras guía y bujes para asegurar la alineación entre el punzón y la matriz durante la operación. El portamatriz se fija a la base de la prensa y el portapunzón se fija al ariete, por medio de la espiga. El ariete es quien ejecuta la operación de prensado.

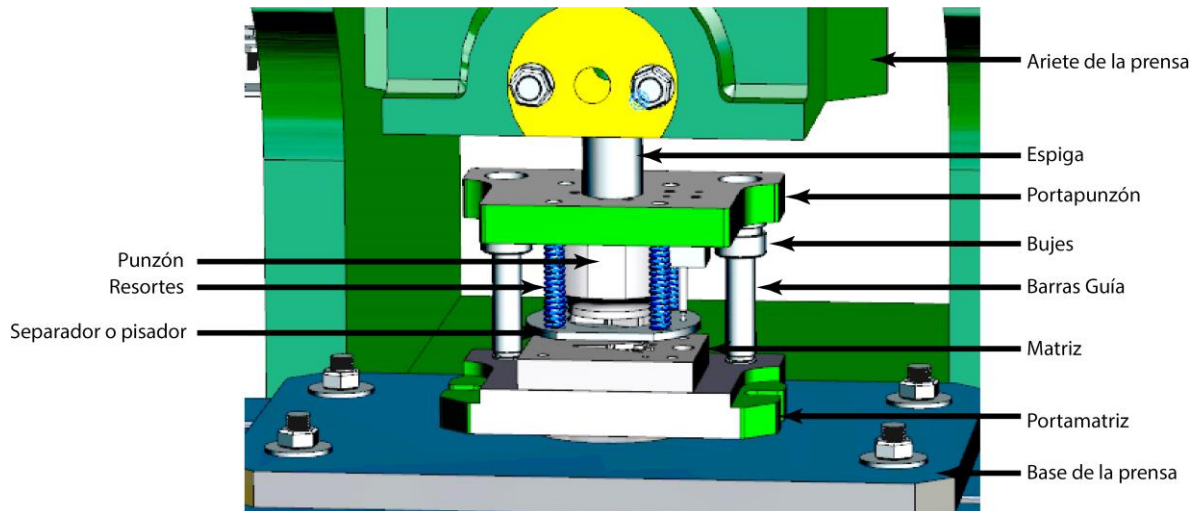


Figura 1.1 Componentes básicos de un troquel para una operación de corte.

Los troquel de corte o punzonado deben incluir un pisador que cumple con la función de separador, debido a que el agujero que se genera en el material es del mismo tamaño que el punzón de corte y tiende, por efecto de la recuperación elástica, a moverse en conjunto con el punzón. Por otro lado, en los troqueles de embutido, el pisador no tiene el fin de separar la lámina del punzón sino más bien pretende eliminar defectos tecnológicos que se presentan en dicha operación, como lo son las llamadas “arrugas”, las cuales consisten en una serie de pliegues que se forman radialmente en la pestaña o pared de la pieza de trabajo.

Como se aprecia en estos 2 procesos es necesario un pisador, el cual tiene 2 funciones diferentes, según la operación que se realice. El pisador generalmente es una placa con una cavidad ligeramente más grande que el punzón que va de 1.5mm a 3mm. (*Paquin, 1962*)

Para troqueles que son alimentados por tiras o rollos de lámina metálica, se requiere de un dispositivo que detenga el avance de la lámina entre cada ciclo de prensado, dicho dispositivo se conoce como tope. Los topes van desde simples pernos localizados en la trayectoria de la tira para bloquear su avance hasta complejos mecanismos sincronizados que se levantan y retraen con cada acción de la prensa.

Para la construcción y funcionamiento de los troqueles se requiere, además de los elementos anteriores, una gran variedad de componentes complementarios como: bujes, sujetadores, tornillos de fijación, tornillos de apriete, pernos de transporte, sistemas de amarre y bridas de sujeción, entre otros. Todos ellos conforman un complejo sistema que representa un troquel.

1.3 Fundamentos de la operación de embutido.

El presente escrito tiene como finalidad estudiar el proceso de embutido, es por ello, que esta sección se centra en dicho proceso, y a continuación se describe: la definición del proceso, las variables que intervienen, medidas de anisotropía y capacidad de embutido, el cálculo de la fuerza de embutido, el ensayo estandarizado *Swift cup test* o ensayo *Erichsen*, y finalmente el cálculo de la fuerza del pisador a partir de una rosca, con un tornillo de potencia.

Un proceso de conformado de lámina está definido por *ASM (American Society for metals)* como el proceso de transformar una lámina (específicamente plana), en una pieza con una forma deseada, sin fracturas o un excesivo adelgazamiento de pared.

El embutido es un proceso de conformado de lámina el cual es definido como un proceso en el cual se causa una elongación en una dirección y una compresión en la dirección perpendicular (*ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*).

En la Figura 1.2 se aprecia que en la zona conocida como “*pestaña*” (material que aún no ha sido embutido) la fuerza transversal actúa como una compresión, mientras que la fuerza radial ejerce una fuerza de tracción hacia la dirección del embutido.

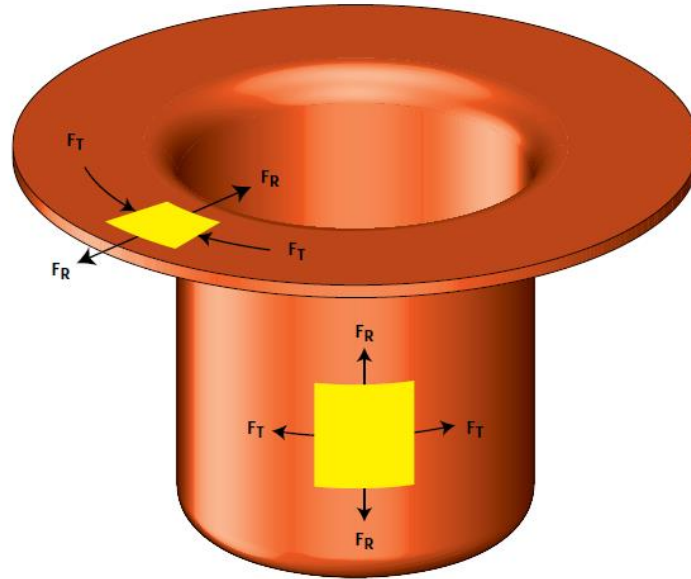


Figura 1.2 Fuerzas ejercidas en un proceso de embutido de una copa redonda con pisador. (Schuler, 1998)

El embutido profundo es un proceso sumamente usado hoy en día en la industria, se utiliza generalmente para generar piezas con cavidades, piezas huecas, cajas y formas complejas. Aunque el nombre de este tipo de manufactura evoca a la realización de piezas con cavidades profundas, puede también realizarse en piezas con cavidades de reducida profundidad.

El principio del embutido profundo consta de un punzón que al ejercer una fuerza sobre una lámina, dentro de una cavidad conocida como matriz, la lámina se deforma plásticamente. Esta lámina es sujeta por un pisador o anillo de sujeción para evitar defectos en el embutido como lo son las “arrugas”. Conforme el punzón avanza hacia abajo la lámina se deforma plásticamente hasta obtener la forma deseada.

Durante la operación de embutido existen distintas etapas. Al inicio del proceso se puede observar que existe una operación de doblado cuando el punzón empuja a la lámina. La lámina se dobla sobre el borde de la matriz y el punzón y el perímetro exterior de la lámina se mueve hacia el centro. Conforme el proceso avanza la lámina es enderezada. El material que está en el centro de la copa así como el que se encuentra en el radio del punzón se mueve hacia abajo,

conforme el punzón baja y el material que se endereza se jala para que exista una formación de pared.

Para la creación de una pared completa es necesario más material, por lo que el material externo del punzón llamado brida o “pestaña”, debe superar la fricción que existe entre el pisador y el punzón con la lámina que la aprisionan para que empiece a fluir hacia el centro de forma que sustituya al material doblado. En esta etapa del proceso el material externo se embute.

Existen dos tipos de fricción involucrados en este proceso: la estática, la cual termina hasta que el material se mueve, en este punto se tiene una fricción dinámica. En este punto es de vital importancia la correcta aplicación de fuerzas de sujeción y la fricción entre el pisador y la lámina, así como la fricción entre la lámina y el punzón. Por lo que el uso de lubricantes o compuestos adecuados es imprescindible para disminuir la fricción y prevenir fallas.

En procesos de embutido ocurre una compresión entre la matriz y el pisador, una vez que va avanzado la profundidad del embutido el material se estira hacia el centro por lo que el perímetro exterior se hace menor, y es por ello que tiende a incrementar su espesor.

Un punto de interés es que durante el proceso de embutido se da un adelgazamiento de las paredes de la lámina. Este se vuelve crítico, cerca la base de la copa, este adelgazamiento puede ser de hasta un 25%, en casos extremos, lo cual da lugar a la falla de la pieza por fractura.

1.3.1 Variables del proceso de embutido

El embutido de piezas acopadas es una operación altamente usada en la industria metalmecánica y para realizar un análisis de dichos procesos es necesario conocer las variables que interfieren en este proceso dentro de las cuales también se contemplarán las propiedades de la lámina. En la (Figura 1.3) se muestran una parte de las variables de diseño y variables del proceso de embutido que es necesario contemplar.

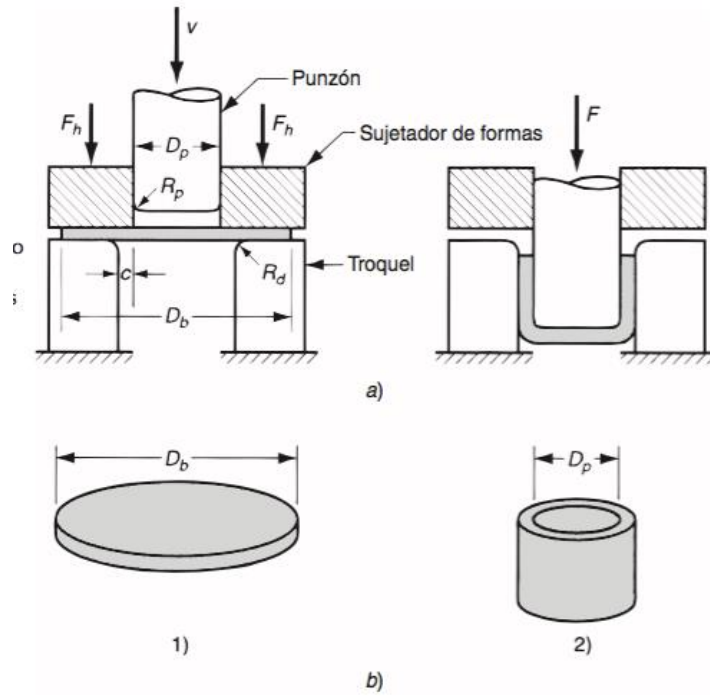


Figura 1.3 Variables que intervienen en el proceso de embutido (Groover, 2010).

En donde:

F_h = Fuerza del pisador

F = Fuerza de embutido

V = Velocidad de la prensa

C = Claro (espacio entre los herramientales)

R_d = Radio del dado o "matriz"

R_p = Radio del punzón

D_p = Diámetro del punzón o del embutido

D_b = Diámetro del disco

Existen variables que son parte del diseño como lo es el diámetro del punzón D_p , el radio del mismo R_p , el radio de la matriz R_d , la holgura o claro entre

punzón y matriz C y el diámetro del disco D_b . Todas ellas son importantes al momento de diseñar ya que por ejemplo: si el radio del punzón y el de la matriz tienen esquinas agudas R_p y R_d serán igual a cero en consecuencia en vez de realizarse una operación de embutido se perforará la lámina. Es por ello que se debe tomar en cuenta que el “claro” que es el espacio entre el punzón y matriz, sea aproximadamente 10% mayor que el espesor de la lámina (*Paquin, 1962*).

Por otro lado, existen variables que son propias del proceso de embutido como lo es la fuerza del pisador F_h , la resistencia del material de trabajo, la fuerza de fricción que existe entre matriz y material de trabajo y entre material de trabajo y pisador. Finalmente, el claro, es una variable que se controla en el diseño, sin embargo, al momento de alimentar el troque, dependiendo del calibre de la lámina, el claro puede variar. Si bien no es común pero si usado en la industria, existen troqueles diseñados para trabajar con dos calibres de lámina, los cuales no afectan en el producto final, ya que la diferencia de medidas entre un calibre y otro no es abismal, pero como es de esperarse la fuerza necesaria para realizar la operación se ve incrementada.

1.3.2 Medidas de anisotropía y capacidad de embutido.

El valor r o relación de deformación plástica relacionado con la capacidad de embutido es un factor de anisotropía. Es definido como la relación del estrechamiento real con el espesor real en una elongación uniforme.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad 1.1$$

ε_w = Deformación transversal

ε_t = Deformación en el espesor

El valor r es una medida de la habilidad de un material a resistir el adelgazamiento de pared. Un valor alto de r indica que es un material con buenas propiedades para ser embutido.

El valor r frecuentemente cambia con la dirección del laminado lo cual es visible como un defecto conocido como “orejas”, el cual es la formación de irregularidades en el borde superior de la pieza embutida. Por lo tanto, es común medir el promedio del valor r o el promedio de la anisotropía normal (r_m) y la anisotropía plana (Δr), las cuales están definidas como:

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad 1.2$$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}$$

Cada una de ellas tiene una interpretación. El factor r_m determina el promedio de la profundidad de la copa o la altura máxima posible de la copa mientras que Δr determina la altura del borde ondulado conocido también como: “orejas”. Es por ello que una combinación de r_m grande y una baja Δr proporcionarían una capacidad de embutido óptima.

El valor teórico máximo de r_m es de 3.0 mientras que el del aluminio es de entre 1 y 1.4, y el de las aleaciones de aluminio es de entre 0.6 y 0.8 (ASM, *ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*). Sin embargo, es importante mencionar que un material idealizado como isotrópico cuenta con un $r_m = 1$ y un $\Delta r = 0$ (ASM, *ASM Handbook Forming and Forging, 1993*).

En la Tabla 1.2 se muestra una tabla de valores r_m de distintos materiales incluyendo el aluminio y las aleaciones de aluminio mencionadas anteriormente.

Tabla 1.2 Intervalos característicos de anisotropía normal promedio r_m para diferentes hojas metálicas (ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000).

Aleaciones de zinc	0.4-0.6
Acero laminado en caliente	0.8-1.0
Aleaciones de aluminio	0.6-0.8
Cobre y latón	0.6-0.9
Aluminio	1-1.4
Aceros inoxidables	0.9-1.2
Aceros de baja aleación, de alta resistencia	0.9-1.2

Experimentalmente se ha mostrado que la tendencia a la formación de “orejas” incrementa significativamente en el embutido, cuando incrementa el valor numérico de la anisotropía plana Δr , lo cual es considerado indeseable por 2 razones. La primera es que se requiere cortar material para producir una copa con un borde parejo, por lo que el rendimiento del material es menor. Y la segunda razón es que las “orejas” altas tienden a arrugarse y al ser obligadas a pasar entre en claro del punzón y matriz, existe un desgaste excesivo en la matriz, lo que genera que la vida útil del troquel se reduzca considerablemente.

El grado del defecto de “orejas” en el embutido profundo de copas redondas es comúnmente cuantificado por medio de la siguiente expresión.

$$\Delta h = \frac{h_e - h_d}{0.5(h_e + h_d)} \times 100\% \quad 1.3$$

En donde h_e es la altura máxima de las “orejas” y h_d es el punto más bajo del valle que forman las mismas. (S. Valberg, 2010)

La capacidad de embutido de un metal es medida por la relación del diámetro inicial del embutido y el diámetro de la copa embutida (usualmente aproximada al diámetro del punzón). Para un material dado hay un límite de embutido llamado *LDR* (*Limit Draw Ratio*) por sus siglas en inglés que representa el mayor diámetro capaz de ser embutido en la matriz de D_p sin un desgarre.

$$LDR \approx \left(\frac{D_0}{D_p} \right)_{MAX} \approx e^\eta \quad 1.4$$

Donde η es un término de eficiencia el cual contempla las pérdidas por fricción. Si $\eta = 1$ $LDR \approx 2.7$ mientras que si $\eta = 0.7$, $LDR \approx 2$

La fuerza de embutido se compone de las fuerzas requeridas en la sujeción de la pieza y de la fuerza necesaria que aplica el punzón para deformar el material: de aquí se desprende que la relación límite de embutido no es precisamente una constante del material, sino una característica del proceso.

Además de LDR existen otras maneras de caracterizar un proceso de embutido por ejemplo la reducción (*ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*).

$$\% Re = \frac{D_0 - D_p}{D_0} 100 \quad 1.5$$

Donde dicho valor tiene que ser menor a 0.5 para lograr un embutido $\% Re < 0.5$

Otro indicador de la capacidad de embutido es la relación de espesor con el diámetro:

$$RED = \frac{t}{D_0} \quad 1.6$$

En donde es recomendable que $RED > 1\%$ para evitar la presencia de “arrugas” en el proceso.

Algunas consideraciones prácticas que afectan la capacidad de embutido son (*Dieter E., 1988*):

- Radio de la matriz: puede ser alrededor de 10 veces el espesor de la lámina
- Radio del punzón: un radio pequeño conduce a un adelgazamiento localizado y desgarramiento

- Claro entre punzón y matriz: 20 al 40% más grande que el espesor de la lámina
- Lubricante en el sitio de la reducción (matriz) para reducir la fricción.

1.3.3 Fuerzas de embutido

En embutidos de partes redondas la fuerza máxima de embutido (F_U [N]) puede ser calculada por la siguiente expresión:

$$F_U = \pi \cdot (D_p + t) \cdot t \cdot S_u \cdot 1.2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1} [N] \quad 1.7$$

Donde D_p es el diámetro del punzón en milímetros, t es el espesor del material en milímetros, S_u es la resistencia a la tracción del material en newtons/ milímetros cuadrados, β es la relación de embutido actual y β_{\max} es la relación máxima de embutido.

La relación de embutido está definida como (Schuler, 1998):

$$\beta = \frac{D_0}{D_p} \quad 1.8$$

Dónde: D_0 es el diámetro del disco y D_p es el diámetro del punzón. Sin embargo, la relación máxima de embutido es función de otras variables más;

$$\beta_{\max} = f(D, d, \mu, r, s, \dots) \approx 2 \quad 1.9$$

La fuerza total requerida en el embutido o *total punch force* es la suma de la fuerza ideal de deformación (*ideal deformation*), las fuerzas de fricción o *friction* y la fuerza requerida para producir el “planchado”, también conocido como *ironing* si es que se presenta (Figura 1.4). El planchado o ironing es generado al tener un claro entre punzón y matriz menor al espesor de la lámina, el metal en esa región es planchado entre el punzón y matriz generando así un espesor uniforme en la

pared; es por ello que en el proceso de embutido, el claro suele ser de entre 10 y 20% más grande del espesor del metal que es embutido.

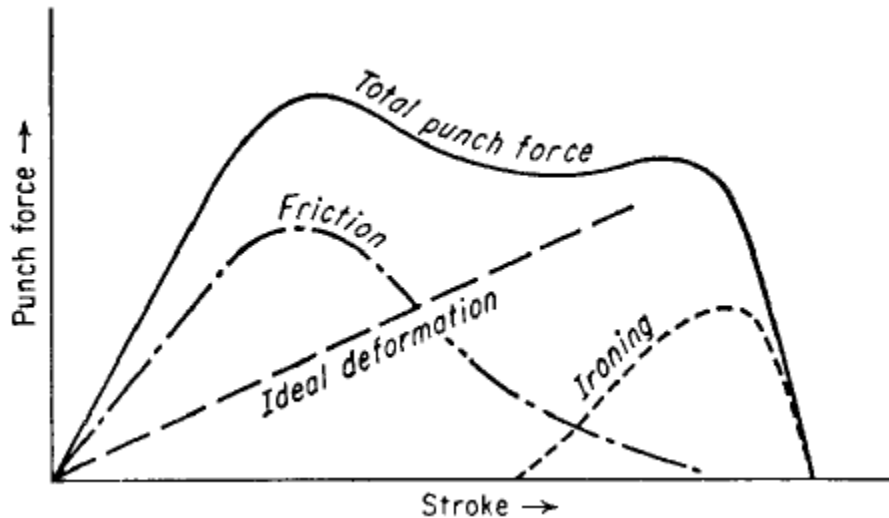


Figura 1.4 Fuerza de embutido vs carrera del punzón. (Dieter E., 1988)

La fuerza ideal de deformación incrementa continuamente con la longitud del embutido ya que la deformación incrementa el estado de esfuerzos por el trabajo en frío. La mayor contribución de la fuerza de fricción es debida a la presión del pisador.

De un análisis de fuerzas en equilibrio durante un proceso de embutido desarrollado por (Sach, 1930) se obtiene una ecuación aproximada a la fuerza total del embutido en función del disco a embutir, en cualquier situación del proceso.

$$P = \left[\pi D_p h (1.1 \sigma_0) \ln \frac{D_0}{D_p} + \mu \left(2H \frac{D_p}{D_0} \right) \right] e^{(\mu\pi/2)} + B \quad 1.10$$

Donde:

P=carga total

σ_0 = Estado de esfuerzos promedio

D_p =Diámetro del punzón

D_0 = diámetro del disco a embutir

H = Fuerza del pisador

B = Fuerza para doblar y desdoblar el disco de embutido

h = Espesor de la lámina

μ = Coeficiente de fricción

En la ecuación anterior el primer término constituye la fuerza ideal necesaria para embutir la copa, el segundo término es la fuerza de fricción generada por el pisador. El término exponencial considera la fricción en el radio del dado y el último término hace referencia a la fuerza requerida para doblar y desdoblar la lámina en el radio del dado. (Dieter E., 1988)

Usualmente la falla del material ocurre en la banda angosta del material en la pared de la copa, justo arriba del radio del punzón donde se somete a un embutido no radial o doblado, pero es sometido esencialmente a esfuerzos de tracción. En ese anillo entre la pared de la matriz y el punzón el metal es sometido esencialmente a esfuerzos planos de estirado y adelgazado. Por lo que la falla ocurre cuando el esfuerzo es aproximadamente igual al esfuerzo de tracción incrementado por el factor de esfuerzo plano.

$$F_{Max} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_u \pi D_p h \quad 1.11$$

Por otro lado, se tiene un desarrollo realizado por (Hosford & Caddell, 1993) en el cual se llega a otra expresión un poco más simplificada, pero que tiene muchas consideraciones las cuales dan como resultado errores en la predicción de la carga, y son las siguientes:

- Toda energía gastada es utilizada para la deformación del material en el radio de la matriz. El trabajo debido a la fricción y el trabajo debido al doblado y desdoblado del material a medida que fluye en la matriz es despreciado en el tratamiento inicial.

- El material no se endurece por trabajo en frío. Esto muestra que n tiene un mínimo efecto en el *LDR*.
- El flujo de material en la matriz (radio) es caracterizado como un esfuerzo plano. $\varepsilon_z = 0$, por lo que el espesor de las paredes de la copa es el mismo que el del diámetro inicial.

El desarrollo completo no es presentado en este reporte. Sin embargo se puede consultar en dicha bibliografía. Aquí se presenta solo a la expresión que se llega después de todo el desarrollo en base a la Figura 1.5, en donde se muestra que r_0 es el radio inicial antes de iniciar el embutido, r es el radio durante el proceso y r_1 es el radio al concluir el mismo. Adicionalmente t representa el espesor de la lámina y h es la altura durante el proceso.

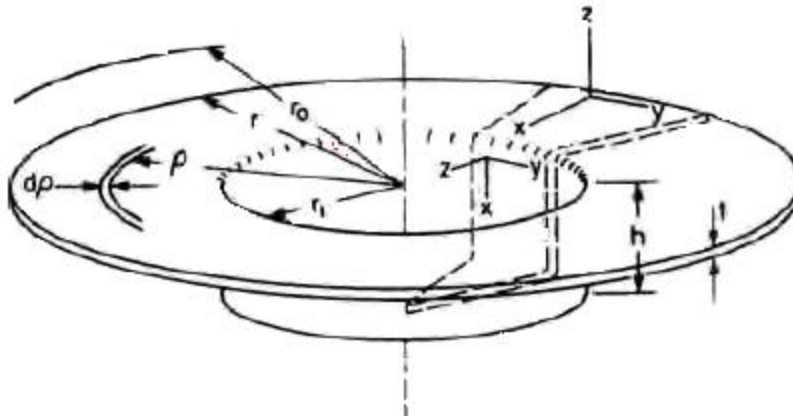


Figura 1.5 Referencia del desarrollo de diagrama de cuerpo libre. (Hosford & Caddell, 1993)

$$\frac{dW}{dh} = \int_{r_1}^r \frac{2\pi t \rho d\rho r_1}{\rho} (\sigma_x - \sigma_y) = 2\pi r_1 t (\sigma_x - \sigma_y) \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad 1.12$$

Por lo tanto tenemos que la fuerza máxima cuando $r = r_0$ se calcula con la Expresión 1.13

$$F_{MAX} = 2\pi r_1 t \sigma_F \ln \frac{D_0}{D_p} \quad 1.13$$

Donde:

$$\sigma_F = (\sigma_x - \sigma_y) = cte \quad 1.14$$

(Fritz, 2013), Plantea una expresión más para la predicción de la fuerza de embutido la cual es la siguiente:

$$F_{ZMAX} = \pi D_m t \left[1.1 \frac{K_{fm}}{\eta_f} \left(\ln \frac{D_0}{D_p} - 0.25 \right) \right] \quad 1.15$$

Donde:

$$D_m = D_p + t$$

η_f = Eficiencia de la deformación $\approx 0.5 - 0.7$

K_{fm} = Estado de esfuerzos en el área del pisador $\approx 1.3\sigma_u$

Por otro lado, la literatura más elemental afirma que la mejor aproximación de la fuerza de embutido es: (Kalpakjian, 2006) (Groover, 2010).

$$F_p = \pi D_p t (S_U) \left[\frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right] \quad 1.16$$

Donde:

S_U = Esfuerzo de tensión

F_p = Fuerza de pistón

0.7 = Factor de ajuste por fricción

El termino 0.7 tiene como origen la relación límite de embutido que puede aproximarse de la siguiente manera

$$LDR \approx \left(\frac{D_0}{D_p} \right)_{MAX} \approx e^n \quad 1.17$$

Donde:

η = Termino de eficiencia asociado a las perdidas por fricción

Fuerza de sujeción para evitar “arrugas” o desgarres en la pieza se puede aproximar con la siguiente expresión: (Groover, 2010).

$$F_h = 0.015Y\pi \left[D_0^2 - (D_p + 2.2T + 2R_d)^2 \right] \quad 1.18$$

Donde:

R_d = Radio del punzón

Y = Esfuerzo de fluencia

La fuerza de sujeción se dice que es aproximadamente una tercera parte de la fuerza de embutido (Groover, 2010).

$$F_h = \frac{1}{3} F_p \quad 1.19$$

1.3.4 Ensayo de copa rápida *Erichsen* (*Swift Cup Test*)

El ensayo más utilizado para medir la capacidad de embutido es el ensayo de copa rápida o ensayo *Erichsen*. Discos de diferente diámetro, son sujetos por medio de un pisador y embutidos en forma de copa con ayuda de un punzón cilíndrico de fondo plano.

Los instrumentales de medida standard para dicho ensayo según la (ASM, *ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*) se muestran en la figura (Figura 1.6).

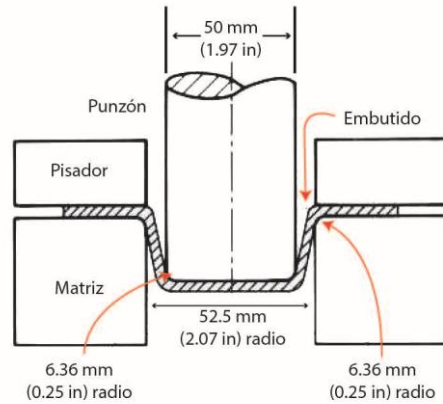


Figura 1.6 Medidas estándar de un ensayo de copa rápida *Erichsen* (ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000).

La capacidad de embutido es expresada ya sea por *LDR* por sus siglas en inglés (*limit draw ratio*) o el porcentaje de reducción. El *LDR* es una relación entre el diámetro D del disco y el diámetro del punzón d (ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000).

$$LDR = \frac{D}{d} \quad 1.20$$

El porcentaje de reducción es definido como:

$$\%r = \frac{100(D-d)}{D} (\%) \quad 1.21$$

La altura de la copa h es aproximadamente:

$$h = \frac{(D^2 - d^2)}{4d} \quad 1.22$$

Un método alternativo para determinar el *LDR* es utilizar discos de un solo diámetro, que son menores que el diámetro crítico usado en el ensayo estándar. Los discos son embutidos a la carga máxima, que generalmente ocurre antes de que se haya producido el 50% del embutido. A continuación se aumenta la fuerza

del pisador para evitar un avance en el embutido, y la carga aumenta hasta el punto de fractura. El LBD (*limiting blank diameter*) es definido por:

$$LBD = \left[\frac{F_{fractura} \cdot (D_{disco} - D_{matriz})}{F_{max.emb}} \right] + D_{matriz} \quad 1.23$$

Por lo que el *LDR* está dado por:

$$LDR = \frac{LBD}{D_{punzón}} \quad 1.24$$

El *LDR* incrementa con el incremento de la anisotropía normal (r_m) y el espesor. También aumenta a medida que el radio del punzón aumenta alrededor de 8 veces el espesor de la lámina, así como incrementa el radio de la matriz alrededor de 12 veces el espesor de la lámina y finalmente con el incremento de la velocidad (*ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*).

En el ensayo *Erichsen* resulta evidente que los parámetros importantes son la fuerza del punzón, la fuerza en el pisador, la lubricación en la interacción lámina/pisador y lámina/matriz, el espesor de la lámina, además de la geometría en cada una de las herramientas utilizadas. A pesar de la simplicidad en los pasos del proceso, la realidad es que su complejidad es elevada. Se han intentado una serie de análisis matemáticos complejos para su descripción y predicción de este proceso, considerando un estado de esfuerzos biaxial sobre la lámina (Hill, 1998).

Existen defectos que pueden ocurrir durante el proceso de embutido, los cuales se han controlado en gran medida. Uno de ellos se le describe como la formación “arrugas” el cual se manifiesta con la presencia de una gran cantidad de pliegues en la zona del doblado de la lámina, una vez terminado el proceso. Este defecto es ocasionado por una falta de control en la fuerza aplicada por el pisador Figura 1.7.



Figura 1.7 Pliegues formados por falta de fuerza en el pisador “arrugas”.

1.3.5 Cálculo de la fuerza del pisador con tornillo de potencia.

Las aplicaciones más habituales de los tornillos de potencia es la fabricación de elementos que ayuden a la elevación de una carga, o el diseño de prensas que transmitan una fuerza para sujetar diferentes componentes. En este caso esto permite calcular el torque con el cual se podrá ejercer una cierta fuerza F .

A continuación, se presentan las expresiones matemáticas para calcular el par torsional para hacer girar al tornillo en la elevación o descenso de una carga (F) para una rosca cuadrada.

El par o momento torsional (T) es igual al producto del esfuerzo P por el radio medio (r_m) del tornillo (Expresión 1.25).

$$T = P \cdot r_m \quad 1.25$$

En la (Figura 1.8) se presenta el esquema de las fuerzas que intervienen en un tornillo de potencia de rosca cuadrada donde:

d_m = diámetro medio de tornillo

p =paso del tornillo

α = ángulo de hélice

λ = Ángulo de avance

F =suma de fuerzas axiales (carga a elevar o descender)

P=fuerza necesaria a aplicar al tornillo para vencer la fuerza de rozamiento y hacer ascender/descender la carga por el plano inclinado.

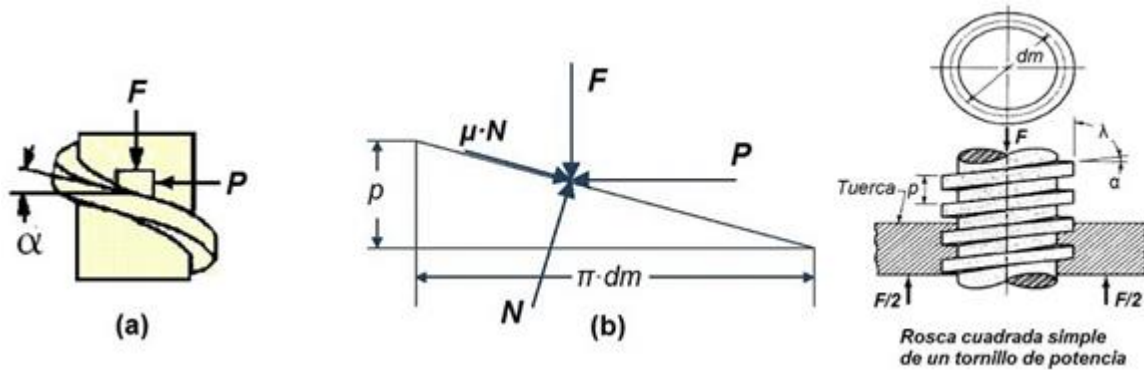


Figura 1.8 Fuerzas que intervienen en un tornillo de potencia (Rodríguez Galbarro, 2018).

Si se realiza un diagrama de cuerpo libre, en base a la figura anterior se cuenta con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ -P + \mu \cdot N \cdot \cos \alpha + N \cdot \operatorname{sen} \alpha &= 0 \end{aligned} \quad 1.26$$

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ -F - \mu \cdot N \cdot \operatorname{sen} \alpha + N \cdot \cos \alpha &= 0 \end{aligned} \quad 1.27$$

Despejando (N) y (P) de 1.26 y 1.27 tenemos:

$$P = N(\mu \cdot \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha) \quad 1.28$$

$$N = \frac{F}{\cos \alpha - \mu \cdot \operatorname{sen} \alpha} \quad 1.29$$

Sustituyendo 1.29 en 1.28 se obtiene que:

$$P = \frac{F(\mu \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha - \mu \operatorname{sen} \alpha} \quad 1.30$$

Por otro lado, la relación entre el ángulo de la hélice y el diámetro medio es:

$$\tan \alpha = \frac{p}{\pi \cdot d_m} \Rightarrow d_m = \frac{p}{\pi \cdot \tan \alpha} \Rightarrow \frac{d_m}{2} = \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot \tan \alpha} \Rightarrow r_m = \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot \tan \alpha} \quad 1.31$$

Sustituyendo 1.30 y 1.31 en 1.25 tenemos:

$$T = \frac{F(\mu \cdot \cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)}{\cos \alpha - \mu \cdot \operatorname{sen} \alpha} \left(\frac{p}{2\pi \tan \alpha} \right) \quad 1.32$$

A partir de:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha &= \frac{p}{C} \\ \cos \alpha &= \frac{\pi \cdot d_m}{C} \\ \tan \alpha &= \frac{p}{\pi \cdot d_m} \end{aligned} \quad 1.33$$

Donde:

$$C = \sqrt{p^2 + \pi^2 \cdot d_m^2} \quad 1.34$$

Sustituyendo en 1.32 se tiene:

$$T_{asc} = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\mu \cdot \pi \cdot d_m + p}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot p} \right) \quad 1.35$$

Si la carga es hacia abajo la expresión anterior se presenta de la siguiente forma:

$$T_{desc} = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\mu \cdot \pi \cdot d_m - p}{\pi \cdot d_m + \mu \cdot p} \right) \quad 1.36$$

En tornillos ACME y unificada la carga normal (N) ya no es paralela al eje longitudinal del tornillo sino que se sitúa inclinada respecto al eje longitudinal del tornillo en una cantidad θ (igual a la mitad del ángulo de la rosca).

El efecto del ángulo θ es incrementar la fricción entre la rosca, debido a la acción de acuñamiento de los hilos, por lo tanto se divide entre el $\cos\theta$ en los términos donde interviene la fricción por lo que se tiene:

$$T_{asc} = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\mu \cdot \pi \cdot d_m \cdot \sec\theta + p}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot p \cdot \sec\theta} \right) \quad 1.37$$

$$T_{desc} = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\mu \cdot \pi \cdot d_m \cdot \sec\theta - p}{\pi \cdot d_m + \mu \cdot p \cdot \sec\theta} \right) \quad 1.38$$

1.4 Experiencias previas con troqueles

En esta sección se describe la experiencia que se tiene con un troquel de corte, en donde se realizó un análisis de las fuerzas de corte. Dicha metodología está representada gráficamente en el diagrama de flujo de la Figura 1.9, la cual es mencionada, ya que parte de la metodología seguida en dicha experimentación es llevada a cabo en el troquel de embutido desarrollado en este reporte.

Se inició con la investigación de las variables que influyen en las fuerzas de corte, así como las propiedades específicas del material a embutir que era necesario cuantificar. Acto seguido fue la instrumentación de una prensa troqueladora, la cual contaba con un troquel de corte, el cual fue diseñado para el corte de chapa de acero, por lo que el material a troquelar, ya se encontraba definido.

Definido lo anterior se continuó con la caracterización de dicho material y en base a la información arrojada, se realizó el cálculo teórico de las fuerzas de corte.

Con respecto a lo calculado anteriormente se realizó la medición de las fuerzas de corte en dicho troquel. Las cuales fueron analizadas en conjunto con los cálculos teóricos. Teniendo como resultado un troquel funcional para ilustrar dicho proceso en los laboratorios de manufactura de la Facultad de Ingeniería.

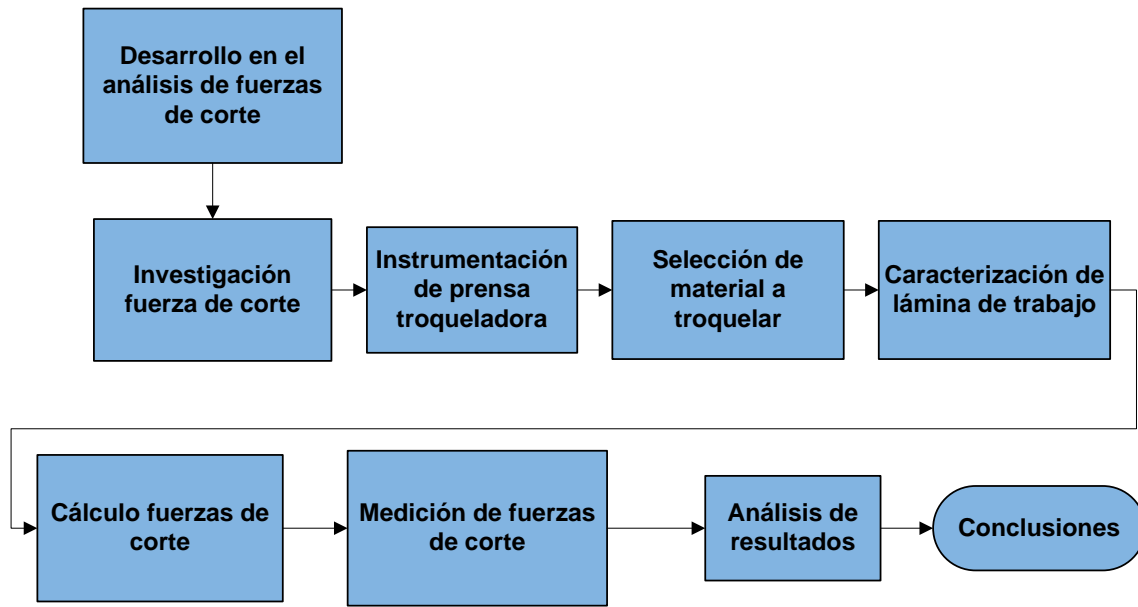


Figura 1.9 Metodología de experiencia previa en troqueles de corte.

1.4.1 Investigación de las fuerza de corte

Las variables en el proceso de punzonado son:

- Espesor del material
- Resistencia a la tracción del material
- Longitud o perímetro de corte.

Es importante estimar la fuerza de corte ya que ésta determina la capacidad (tonelaje) de la prensa necesaria. También es importante tener datos sobre las fuerzas de corte para diseñar en forma correcta los cortadores (matriz y punzón) y evitar deformaciones excesivas de sus elementos, manteniendo las tolerancias dimensionales necesarias en la pieza terminada. Las herramientas, sus sujetadores, así como los soportes, también deben soportar la carga solicitada por el proceso de corte, por esta razón es importante determinar la fuerza requerida antes de la producción del troquel y las piezas troqueladas.

La fuerza de corte F en el trabajo de láminas puede determinarse por:

$$F = \tau \cdot t \cdot L \quad 1.39$$

donde τ es la resistencia al corte de lámina (Mpa); t es el espesor de la lámina (mm) y L representa longitud del borde de corte (mm). En el punzonado, perforado, troquelado y operaciones similares, L es la longitud del perímetro de la forma o agujero que se corta.

Si se desconoce la resistencia al corte, es posible estimar la fuerza de corte mediante el uso de la resistencia a la tracción, de la siguiente manera:

$$F = 0.7 \cdot S_U \cdot t \cdot L \quad 1.40$$

Donde S_U = resistencia última a la tracción (Mpa). (Groover, 2010)

1.4.2 Instrumentación de un troquel en una prensa troqueladora.

A los dispositivos usados en la instrumentación de equipos, para la medición de fuerzas, generalmente se les conoce como dinamómetros o celdas de carga y existen con una variada opción de configuraciones según la dirección de las cargas que se pretende medir. Estos dispositivos se montan en la máquina herramienta y su funcionamiento es a partir de sensores piezoeléctricos.

Cuando una carga mecánica se aplica a un cuarzo que ha sido efecto de un proceso previo, una señal de carga se puede generar de él con magnitud proporcional a la fuerza aplicada.

Se dispone de varios tipos de sensores que proporcionan un monitoreo óptimo de la producción, dependiendo de las condiciones de instalación (Giese , 2017):

- 1) Medición directa: toda la fuerza del proceso pasa a través del sensor.
- 2) Medición indirecta: solo una parte de la fuerza pasa a través del sensor.
- 3) Medición por derivación: la fuerza se mide indirectamente a través del doblez que se presenta en una prensa en C.

Es importante mencionar que estos dispositivos tienen que ser conectados junto con otros componentes para lograr adquirir los datos, ya que las mediciones son instantáneas, por lo tanto, es imposible registrar las señales sin ayuda de una PC debido a la velocidad de los procesos, es por ello que a continuación se

describen todos los componentes necesarios, utilizados para llevar a cabo la medición de fuerzas de corte (Figura 1.10).

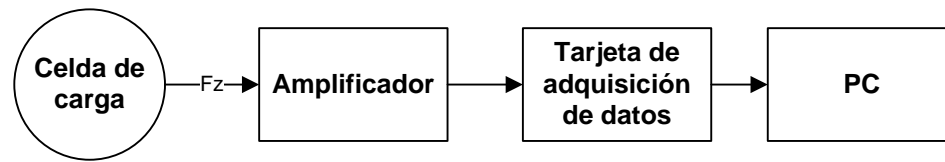


Figura 1.10 Conexión de equipos para la instrumentación de la prensa troqueladora.

- **Celda de carga:** La celda de carga utilizada para la cuantificación de las fuerzas de corte en el proceso de troquelado fue una celda de medición directa de la marca *KISTLER®* la cual tiene un rango de trabajo de 0 a 700KN, que es monta en la espiga del troquel, esto ya que el sensor en dicha posición se encuentra completamente sobre el flujo de la fuerza, por lo que mide de manera directa la magnitud de la fuerza de troquelado. Ya que en el caso de que el sensor no pudiera ser ubicado en el flujo de la fuerza, solo podría medir parte de la misma y la cantidad restante pasaría a través de la estructura en la que está montado.
- **Amplificador y tarjeta de adquisición de datos:** El amplificador es el encargado de amplificar la señal mandada por la celda de carga ya que dichas señales son del rango de picocoulombs.
La tarjeta de adquisición de datos es la encargada de registrar los datos que le manda en tiempo real el amplificador de señales y es la encargada de establecer comunicación con el software.
- **Software DynoWare®:** Es una paquetería utilizada para la adquisición de datos, la cual es compatible con dinamómetros y amplificadores de carga de la marca Kistler®.

DynoWare® es un software para la medición de las fuerzas de corte en aplicaciones de dinamómetros. Es un programa para guardar, analizar y visualizar la reacción de las fuerzas generadas. Fue desarrollado específicamente para la medición de las fuerzas de corte en mecanizados (*Kistler, 2013*).

Una vez conectados los equipos como anteriormente se describió y con la celda de carga montada en la espiga, se realizó una calibración con una celda patrón, la cual asegura de manera comparativa, que las mediciones son correctas. Finalmente es montado el troquel en la prensa mecánica como se muestra en (Figura 1.11) y se verifica la alineación antes de su operación, quedando instrumentado el troquel en la prensa mecánica.

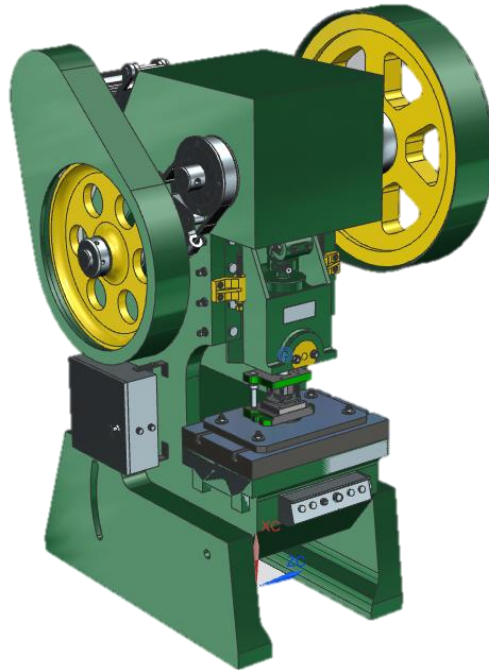


Figura 1.11 Troquel en prensa mecánica.

1.4.3 Caracterización de la lámina de trabajo

El ensayo de tracción estándar, definido por la norma E 8M-04 de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y se lleva a cabo para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, de él se obtiene la información útil para el diseño y análisis de falla.

Cabe mencionar, que del ensayo de tracción se obtiene una curva carga-desplazamiento $P-\Delta L$ que no da ninguna información útil, por lo que es necesario obtener una gráfica esfuerzo-deformación $s-e$, que se calcula con las dimensiones iniciales del espécimen ensayado (curva ingenieril). Los valores arrojados por esta gráfica, son de interés para los diseñadores debido a que las

piezas se diseñan teniendo en cuenta la zona elástica hasta el esfuerzo de fluencia, sin embargo, en los procesos de manufactura es más relevante la curva de esfuerzo real-deformación real $\sigma - \varepsilon$, debido a que se analiza la región plástica, que es necesaria para el análisis de deformación volumétrica.

En la norma E 8M-04 menciona las medidas estándar para el maquinado de las probetas a ensayar (Figura 1.12). Dichas probetas en medida de lo posible, tendrán que mantener las medidas y tolerancias especificadas en la norma para una correcta aproximación de las propiedades mecánicas del material ensayado.

La norma menciona que es necesario maquinar una sección reducida en las probetas, llamada sección calibrada y es en esta parte del material donde realmente se somete la carga y el alargamiento (Figura 1.12).

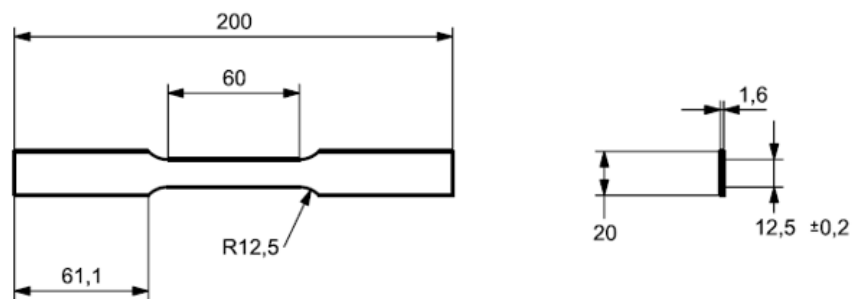


Figura 1.12 Diseño adaptado a la norma ASTM E 8M 04.

En base a lo anterior se caracterizó una lámina de bajo contenido de carbono (AISI 1018), en tres direcciones respecto al sentido del laminado (Figura 1.13) con al menos 3 muestras por cada dirección. Esto con la finalidad de estimar las variaciones de las propiedades mecánicas debidas a la anisotropía; esto se refiere a la orientación preferencial de los granos.

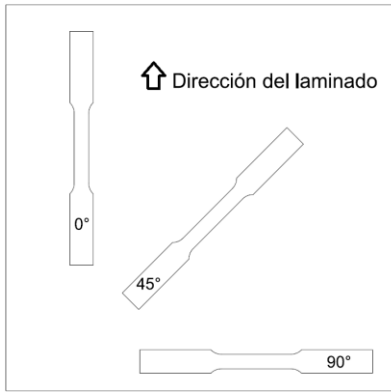


Figura 1.13 Direcciones en la que fue caracterizada la lámina.

En base a lo anterior se obtuvo como resultado un promedio del esfuerzo máximo a la tracción ($S_U = 350MPa$), para así poder garantizar las propiedades del material y así mismo obtener resultados confiables

1.4.4 Cálculo de las fuerzas de corte.

Una vez realizada la caracterización de la lámina a troquelar se realizó el cálculo de la fuerza de corte con ayuda de la Expresión 1.40, obteniendo los siguientes resultados:

Material (AISI 1018):

- t = Espesor de lámina calibre 16= 1.6 mm
- S_U = Esfuerzo máximo a la tracción= 350 MPa

Geometrías:

- L_1 =Longitud del borde de corte = 267.7mm
- L_2 =Longitud del borde de corte =19.95mm
- $L=L_1+L_2$ =Longitud total del borde de corte= 287.65mm

$$F = 0.7 \cdot S_U \cdot t \cdot L$$

$$F = (0.7)(350Mpa)(287.65mm)(1.6mm) = 112758.8N$$

$$F = 112.7588KN$$

1.4.5 Medición de las fuerzas de corte.

Con ayuda del conjunto de equipos antes mencionados se realizaron mediciones de la fuerza de corte, obteniendo como resultado gráficas semejantes a la Figura 1.14. Al mismo tiempo, se obtuvo una tabla de mediciones para lograr localizar el punto máximo de dichas gráficas, lo cual es traducido en el punto de fractura del material.

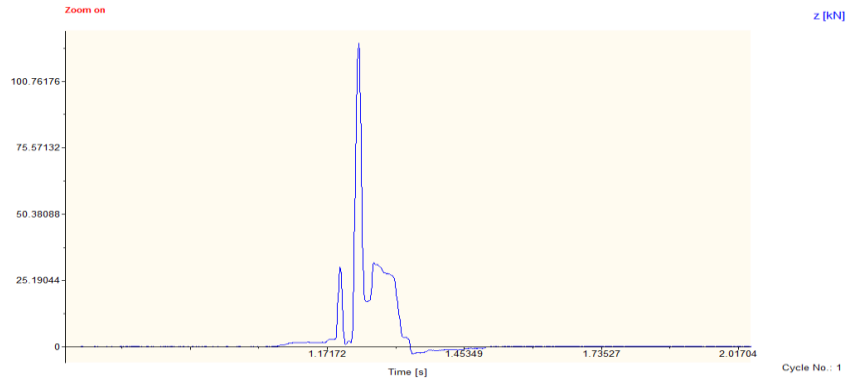


Figura 1.14 Mediciones obtenidas por medio del software DynoWare®.

En la Tabla 1.3 se aprecia que en el segundo 1.237 se encuentra el punto máximo de la gráfica que es el valor de la fuerza de corte o fractura del material, el cual tiene un valor de 115.247 KN.

Tabla 1.3 Fuerza máxima de la gráfica obtenida.

1.232	91.4795
1.233	99.9023
1.234	106.958
1.235	111.987
1.236	114.709
1.237	115.247
1.238	111.572
1.239	102.539
1.24	90.7104
1.241	79.126
1.242	66.9434

1.4.6 Análisis de resultados

Una vez obtenido las mediciones y la fuerza de corte calculada, se tomaron 9 réplicas para hacer un análisis respecto a los modelos analíticos y mediciones experimentales, lo cual arrojó la siguiente información (Tabla 1.4):

Tabla 1.4 Análisis de 9 réplicas con su desviación estándar.

Fuerza Teórica		
S_u [MPa]=	350	
L [m]=	0.28765	
t [m]=	0.0016	
$F_{Teórica}$ [KN]=	112.7588	
Fuerza Experimental		
Prueba	F_{corte} [KN]	%e
1	115.247	2.21
2	116.309	3.15
3	115.393	2.34
4	116.101	2.96
5	116.016	2.89
6	114.636	1.66
7	115.027	2.01
8	114.99	1.98
9	114.563	1.60
$F_{cortepromedio}$	115.364667	2.31
Desv. Est.	0.64234473	

1.4.7 Conclusiones del desarrollo del proceso de corte

Durante esta experiencia en la operación de corte se logró contar con un equipo funcional para la medición de fuerzas de corte de lámina, teniendo un error promedio del 2.3% entre los análisis experimentales y analíticos. Estos análisis correspondieron de manera satisfactoria entre la fuerza experimental y analítica que fueron de gran ayuda a manera ilustrativa a los alumnos de la Facultad de Ingeniería.

2 Metodología y desarrollo del troquel de embutido

En esta sección se inicia con la metodología de trabajo propuesta para el desarrollo del presente escrito, la cual es mostrada esquemáticamente en la Figura 2.1. Es importante recordar que parte de la siguiente metodología es homologa a la llevada en experiencias previas con troqueles de corte, ya que anteriormente arrojó resultados satisfactorios.

Como primera parte, se determina cuál de las pruebas de análisis de capacidad de embutido de los materiales es la más adecuada. Esto a partir de las necesidades del equipo de trabajo en ese momento, así como también, considerando los recursos con los que cuenta la institución para asegurar la realización del mismo.

Una vez analizados los equipos con los que se cuenta, se determina que el proyecto a realizar es: un troquel de embutido para implementar un ensayo *Swift cup test (Erichsen)*, el cual tiene la capacidad de ser montados en una máquina de ensayos universal o en una prensa troqueladora. Es por ello que en el diseño del troquel se toman en cuenta diferentes configuraciones, para que el troquel tenga la capacidad de acoplarse fácilmente a la máquina de ensayos universal o a la prensa troqueladora.

Las medidas de dicho troquel son determinadas en base a (*ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*), para verificar que el troquel cumpla con medidas estándar, y de esta manera poder comparar que las pruebas realizadas, sean válidas, ya que, en la documentación inicial de este proyecto se encontró que (*Ramírez Toledo , 2016*) desarrollo la validación de un código de elemento finito, el cual con ayuda de los herramientas que se propone generar, se tendrá la capacidad de indagar aún más en la investigación de otros materiales.

Una vez definida la configuración y medidas de los herramientas, se investigan los materiales más eficientes para la realización del troquel así como los tratamientos térmicos adecuados para los mismos.

La manufactura del troquel es realizada en máquinas convencionales como lo es torno y fresadora y las partes que requieren precisión, se generan en máquinas de control numérico.

Acto seguido de la manufactura, se implementa el troquel en la máquina de ensayos universal para verificar su correcto funcionamiento y no tener complicaciones futuras. Además de realizar múltiples pruebas que garantizan la estandarización del proceso.

En la etapa de la selección del material de prueba, se pretende trabajar con aleaciones de aluminio de la serie 6000, el cual es para uso específico de embutido, sin embargo, se observa que el aluminio de dicha serie es de difícil acceso para pequeñas y medianas empresas en México.

La serie 3003 es una serie sumamente comercial y usada en el país por lo cual con el fin de que el estudio pueda ser utilizado por una mayor parte de la industria, se toma la decisión de utilizar dicha serie. Adicionalmente se decide utilizar 2 calibres de lámina para analizar su comportamiento con respecto al claro entre los herramientas, así como analizar el efecto de un tratamiento de recocido en dicha serie, ya que la lámina distribuida en México cuenta con un tratamiento de endurecimiento H14.

Una vez definido lo anterior, se caracteriza la lámina y para ello se realizan probetas de las 4 condiciones de las que partimos. Dichas probetas se generan en una máquina de control numérico CNC para lograr una mayor precisión en la zona calibrada.

Una vez que se tienen las probetas de los ensayos de tracción, a continuación se generan los discos necesarios para la experimentación, los cuales se generan con ayuda de una máquina de corte por chorro de agua, esto ya que dichos discos tienen que ser sometidos al tratamiento de recocido al mismo tiempo que las probetas, para evitar variaciones en las propiedades.

Una vez generadas las probetas y los discos de embutido, se realiza el recocido de la mitad de ambos en una mufla, dejando enfriar al aire, para aumentar su ductilidad.

Una vez finalizado lo anterior se realizan los ensayos de tracción y partir de los datos obtenidos se generaran las curvas de esfuerzo-deformación para obtener la resistencia a la tracción de la materiales, de las 4 condiciones planteadas.

En la parte de la experimentación se realizan embutidos de las 4 condiciones planteadas, para que a partir de los datos obtenidos, se continúe con el análisis de los resultados y así obtener conclusiones respecto al efecto del tratamiento térmico y el efecto del claro en los embutidos. Esto a partir de la capacidad de embutido de cada material.

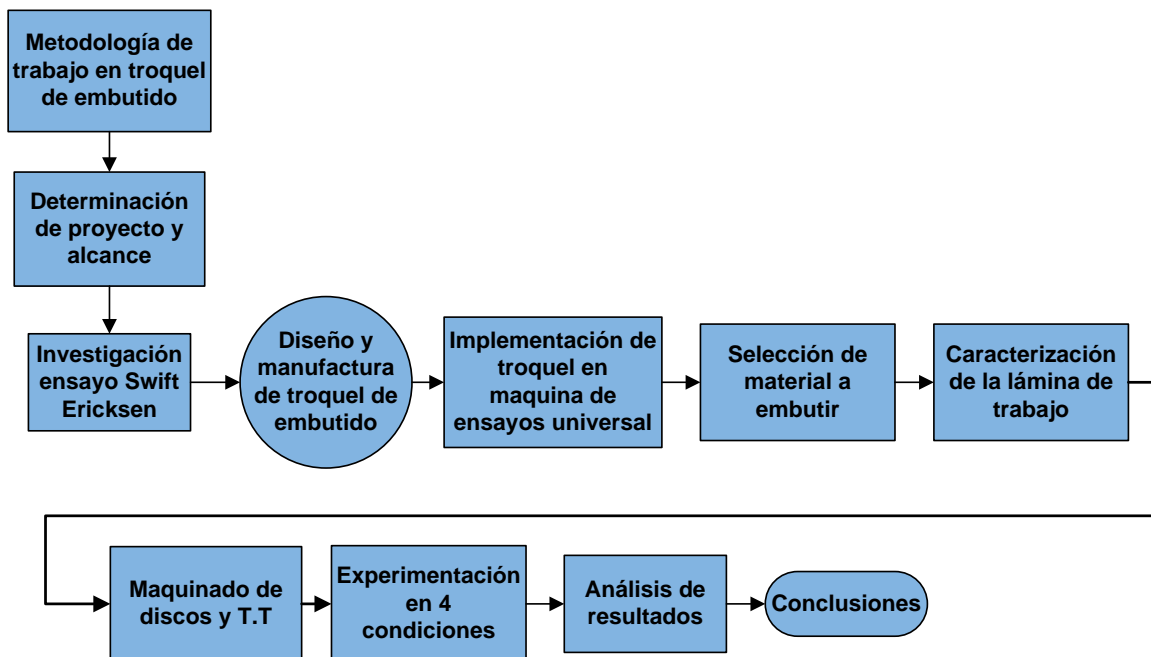


Figura 2.1 Metodología de trabajo en el troquel de embutido

2.1 Diseño de herramientas para el ensayo *Erichsen*

En la Figura 2.2 se desarrolla a detalle la metodología empleada en el diseño y manufactura del troquel de embutido, mencionada en el esquema anterior.

La selección de geometría de la pieza a generar y medidas del troquel son determinadas en base a (ASM, ASM Handbook Mechanical Testing, 2000), para

verificar que el troquel cumpla medidas estándar, y de esta manera se tenga la capacidad de comparar con otras pruebas realizadas y que sean válidas.

Una vez seleccionada la geometría y definido el material de embutido, se comienza a realizar los cálculos de los parámetros de embutido, para garantizar que las copas puedan ser generadas.

Con lo anterior se procede a realizar el diseño CAD en el cual se definen las tolerancias de los componentes y ensamble del mismo.

Una vez definida la configuración y medidas de los herramientales, se investigan los materiales más eficientes para realizar el troquel así como los tratamientos térmicos más adecuados para los mismos.

La manufactura del troquel es realizada en un 90% en máquinas convencionales como lo es torno y fresadora. Mientras que las partes que requieren precisión, se utiliza máquinas de control numérico.

Una vez generados los herramientales se continúa con el centrado de los componentes, el cual es un proceso que define el correcto funcionamiento de los elementos o el fracaso del mismo.

Una vez finalizada la manufactura y el centrado de componentes, se realiza el temple del punzón y matriz por medio de baños de sales, para garantizar que no exista una descarburización y evitar deformaciones en las piezas durante el temple.

En base a lo anterior se realiza el ensamble final y se implementa en la máquina de ensayos universal para verificar su correcto funcionamiento y así evitar complicaciones futuras. Además de realizar múltiples pruebas que garantizaran la estandarización del proceso.

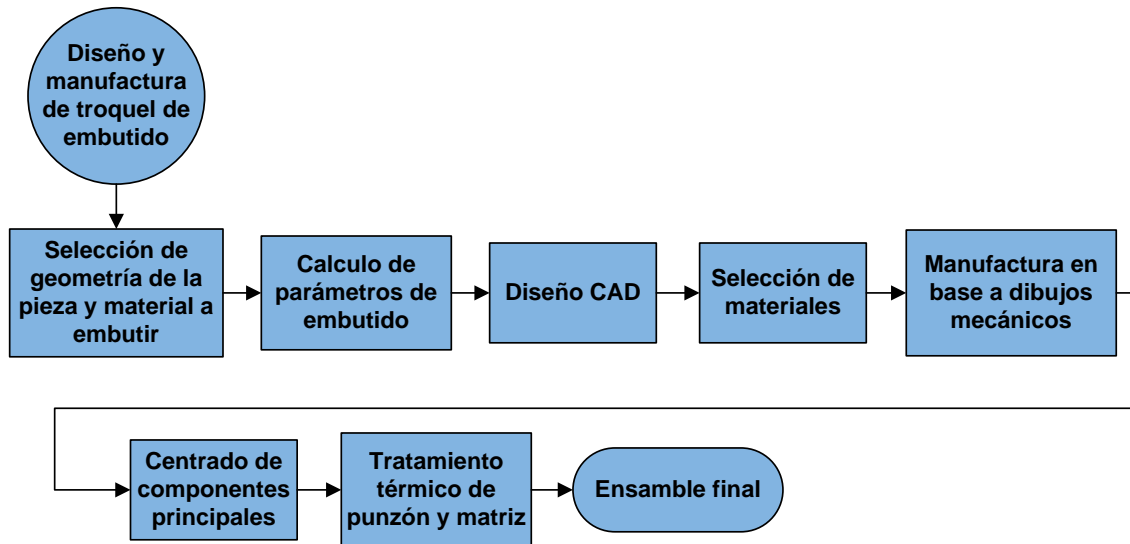


Figura 2.2 Metodología de diseño y manufactura del troquel de embutido

2.1.1 Cálculo de parámetros del proceso de embutido

En el proceso de diseño de los herramientas se sabe que es importante garantizar que el embutido es capaz de generarse con las medidas estándar (Figura 1.6) ya que el disco inicial del que se pretende partir es de 85 mm de diámetro, es por ello que en base al capítulo 1 se sustituye en las Expresiones 1.20, 1.21 y 1.6 obteniendo lo siguiente:

$$LDR \approx \left(\frac{D_0}{D_p} \right) = \frac{85mm}{50mm} = 1.7 < 2$$

$$Re = \frac{D_0 - D_p}{D_0} = \frac{85mm - 50mm}{85mm} = 0.41 < 0.5$$

$$RED_{18} = \frac{t_0}{D_0} = \frac{1.3mm}{85mm} \cdot 100 = 1.53\% > 1\%$$

$$RED_{20} = \frac{t_0}{D_0} = \frac{0.86mm}{85mm} \cdot 100 = 1.01\% > 1\%$$

De esta manera se asegura que LDR y Re están dentro de los límites del embutido máximo y los calibres de la lámina garantizan teóricamente que no existirán “arrugas” considerables en el proceso ($RED > 1\%$).

2.1.2 Diseño CAD

En esta sección de la metodología se propone diseñar los herramientas del troquel de embutido, con la fuerza del pisador y el punzón de manera independiente (no con resortes como es comúnmente usado en la industria). El motivo es poder variar los factores en distintos niveles y así poder analizar de manera independiente el efecto de cada variable en el producto final.

A continuación se diseñan los herramientas necesarios con ayuda de un software CAD, obteniendo como componentes principales el punzón, la matriz, porta-matriz y pisador, estos en base a las medidas estándar mostradas en la Figura 1.6. Es importante enfatizar que se pretende aislar de la medición la fuerza del pisador, es por ello que se insiste en no utilizar resortes como es el caso general en este componente, dando motivo a ser diseñado en base a una rosca en el porta-matriz. Obteniendo como resultado el diseño que a continuación se muestra en la Figura 2.3.

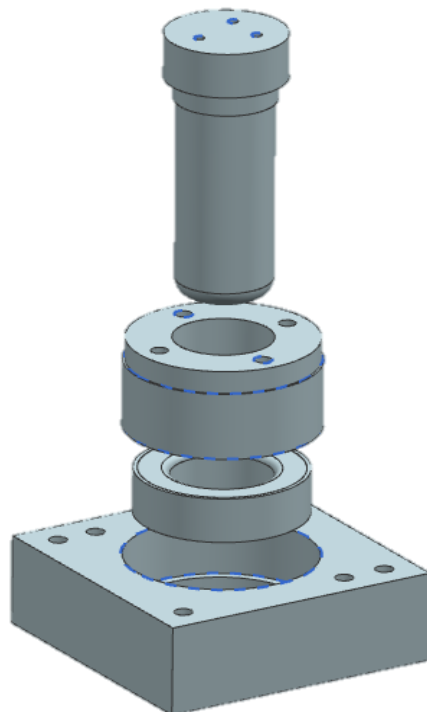


Figura 2.3 Diseño de los elementos principales del troquel de embutido.

Las medidas de dichos componentes como se menciona anteriormente, están basadas en los instrumentales propuestos por la (ASM, *ASM Handbook Mechanical Testing, 2000*) las cuales son medidas estándar que garantizan una comparativa con experimentaciones realizadas en otras partes del mundo. Sin embargo los dibujos mecánicos a detalle del cada uno de los elementos se encuentran en el Anexo B.

2.1.3 Selección de materiales

En el caso de los instrumentales que no tienen contacto con la lámina que es embutida son manufacturados en un acero AISI 4140T que es un acero de grado maquinaria al cromo molibdeno los cuales le ayudan a aumentar su dureza y la resistencia a la tracción, mejoran su templabilidad y aumenta su resistencia al desgaste. Es un acero de baja aleación y medio carbono, el cual ya viene templado en aceite, sin embargo, posee buena maquinabilidad, por lo que es altamente usado en aplicaciones donde se requiere dureza, tenacidad y resistencia al desgaste. Es por ello que el porta-matriz y el pisador son de dicho acero el cual tiene una dureza aproximada de 42 HRC.

En el caso de la matriz y el punzón se selecciona un acero O1 ya que las corridas de los experimentos son cortas, esto en base a la Tabla 2.1, es por ello que no se selecciona un acero D2 como comúnmente se realiza para procesos de trabajo en frío.

El acero AISI O1 es un acero grado herramienta el cual ofrece una alta dureza superficial y tenacidad después del temple y revenido. Es considerado como un acero indeformable, lo que se traduce en que no sufre deformaciones en el proceso de temple o en su defecto son mínimas, por lo que con frecuencia después del temple y revenido quedan con dimensiones prácticamente idénticas a las que tenían antes del tratamiento. Ofrece buenas corridas iniciales de producción y buena continuidad de producción entre rectificadas. Es templado en aceite de entre 780 y 820°C y revenido de entre 180 a 400°C obteniendo durezas de entre 53-63 HRC y tiene como propiedades: resistencia al desgaste, buena

dureza y tenacidad es por ello que usualmente es utilizado en herramientas de corte y estampado para corridas cortas.

Tabla 2.1 Materiales típicos empleados en punzones y matrices de embutido (ASM, ASM Handbook Forming and Forging, 1993).

Material a embutir	Número de piezas a embutir		
	10,000	100,000	1,000,000
Aluminio y aleaciones de cobre	W1; O1	O1; A2	A2; D2
Aceros con calidad de embutido	W1; O1	O1; A2	A2; D2
Aceros inoxidables de la serie 300	W1 con recubrimiento de cromo.	A2 nitrurado	D2 o D3 nitrurados o cementados.

2.1.4 Manufactura de herramientas

Una vez concluido el diseño, se continúa con la manufactura de los componentes, los cuales son maquinados en máquinas-herramienta convencionales. Esto lleva a tener algunas complicaciones, como lo son radios, centrado de piezas, juego en los indicadores de las máquinas etc. En esta sección se describe el proceso llevado para asegurar la alineación en los componentes, que es esencial para un correcto funcionamiento de los componentes.

Todas las piezas inicialmente se montan en un *Chuck* de 3 mordazas (Figura 2.4), para poder realizar un refrentado, barrenado con broca de centros y cortes de desbaste, dejando un sobre-material de 40 milésimas de pulgada, esto ya que difícilmente se puede asegurar un centro en toda la pieza, debido a que en

la parte que está dentro de la mordaza no necesariamente tiene el mismo centro que la parte que se está cilindrando.

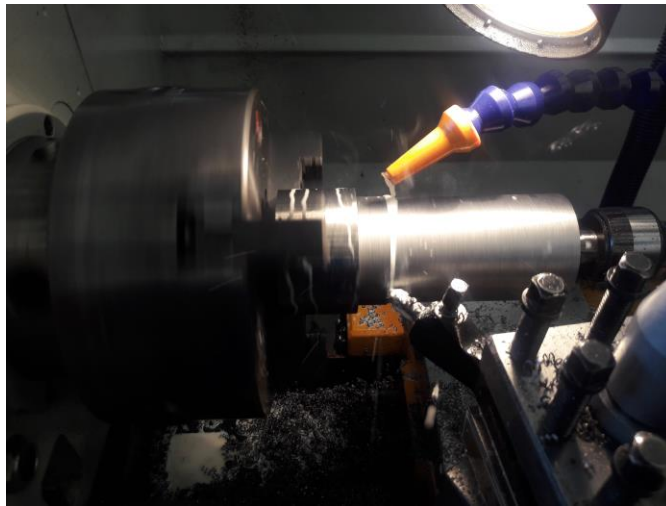


Figura 2.4 Punzón en *Chuck* de 3 mordazas.

Una vez se cuenta con las piezas cilindradas 40 milésimas arriba de la medida se continúa con el maquinado de las piezas entre puntos (Figura 2.5) eliminando así la pequeña desviación que se puede generar en el *chuck* de 3 mordazas. Dando también en esta etapa un mejor acabado con RPM's mayores y avances y profundidades menores.

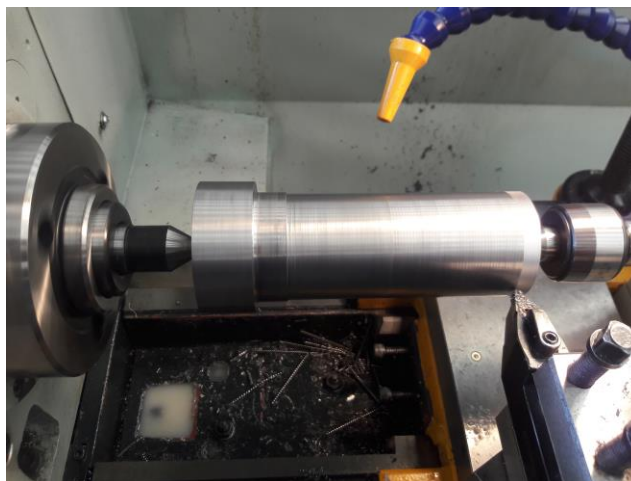


Figura 2.5 Punzón entre puntos (acabado).

En el caso de piezas que no son cilíndricas en su periferia como el caso del porta-matriz y porta-troquel inferior, es necesario maquinar con ayuda de un

Chuck de 4 mordazas, como se muestra en la Figura 2.6, ya que es necesario asegurar la alineación de la cara frontal de las piezas con el cilindro a maquinar, ya que ambos requieren ser perpendiculares para asegurar la alineación de los componentes en el momento de ser ensamblados.

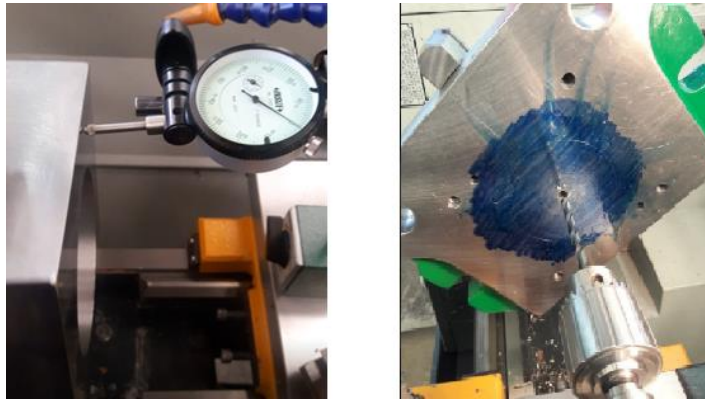


Figura 2.6 Porta matriz y porta troquel inferior en *Chuck* de 4 mordazas.

Como es sabido el maquinado de radios no es igual de sencillo en una máquina de control numérico CNC a una convencional, es por ello que se cuenta con 2 opciones para realizar este tipo de trabajos, la primera y con más margen de error es aproximar a la medida por medio de limas, sin embargo esta opción requiere experiencia del operario y requiere mucho tiempo de ajuste, ya que en el caso de salir de la tolerancia requerida es necesario volver a maquinar la pieza completa, desde un inicio. Por esta razón se determina realizar herramientas de corte con la geometría de los radios necesitados en el punzón, matriz y pisador (Figura 2.7).



Figura 2.7 Maquinado de radios en punzón y pisador.

2.1.5 Centrado de componentes principales.

Una vez se cuenta con los componentes del troquel se genera el ensamble y la alineación entre el punzón y la matriz, que son los elementos de mayor interés, ya que entre estos componentes es donde se realiza la operación de embutido.

Es común que en piezas maquinadas por medios convencionales se tenga un margen de error por el juego de los indicadores, es por ello que el proceso depende del operario, su experiencia, etc. Por esta razón al punzón se le deja un escalón del mismo diámetro de la matriz para así garantizar el mismo centro en la pieza, y al momento de barrenar en el porta-punzón no existiera una desviación entre punzón y matriz (Figura 2.8), ya que esto puede generar rupturas de la lámina o adelgazamiento excesivo localizado, al no tener un claro uniforme en la periferia de la herramienta de embutido.

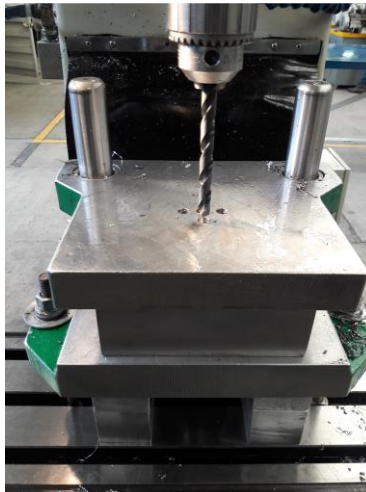


Figura 2.8 Alineación de punzón y matriz.

2.1.6 Tratamiento térmico de punzón y matriz.

Una vez maquinados los componentes y seguros de un correcto ensamble, se realiza el temple del punzón y matriz por medio de baños de sales para evitar la descarburización de los herramientas, garantizar un calentamiento homogéneo y reducir también las deformaciones producidas en el temple. Teniendo como resultado del tratamiento; piezas con una dureza promedio de 59 HRC (Figura 2.9).



Figura 2.9 Medición de dureza HRC.

2.1.7 Ensamble con componentes templados.

En el caso específico del diseño propuesto, el pisador ejerce la fuerza por medio de una rosca, motivo por el cual es necesario fijar la matriz al porta-matriz-pisador. Por esta razón la fijación de estos componentes es a partir de un ajuste medio, (Figura 2.10) para evitar la rotación, mientras se da el par de apriete en el pisador, y garantizar que no existe juego entre ambos componentes.



Figura 2.10 Ensamble con ajuste medio.

Por la razón anterior, el ensamble final no es capaz de ser realizado, hasta que los componentes están templados, y se asegure, que los mismos, no sufrieron de deformaciones, o variación de medidas y tolerancias en el proceso de temple. Una vez realizado lo anterior se tiene como resultado el troquel ensamblado en esta etapa de la metodología seguida (Figura 2.11).

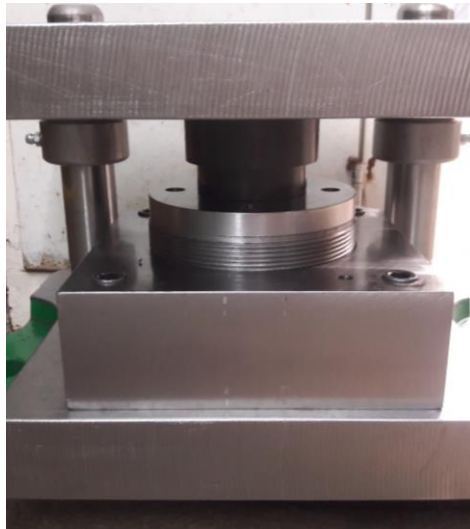


Figura 2.11 Ensamble de troquel.

2.2 Caracterización de la lámina a embutir

La lámina de aluminio que se distribuye en México actualmente, en calibre 18 y 20 es de la 3003 con un tratamiento H14; esto quiere decir que su principal aleante es el Mn el cual incrementa su resistencia a la tracción, sumado a un tratamiento H14 que es un tratamiento de endurecimiento por medio de trabajo en frío. Es por ello que los proveedores de Aluminio en México comentan que la serie 3000 pasó a sustituir a la serie 1000 en calibres delgados. Sin embargo, los fines para los que está pensado esta lámina no son el embutido, es por ello que es más relevante una mayor dureza que la ductilidad en esta serie en específico.

En México usualmente los proveedores de lámina no otorgan un certificado de calidad o propiedades específicas de sus materiales en compras mínimas a una tonelada, es por esta razón que es necesario caracterizar la lámina mediante ensayos universales de tracción en tres direcciones respecto al sentido del laminado (Figura 2.12) con al menos 3 muestras por cada dirección. Esto para

analizar las variaciones de las propiedades mecánicas (anisotropía) debido al trabajo en frío del tratamiento H14.

Como es sabido, se trata de una lámina que no ha sido producida para procesos de conformado como las de la series 5000 y 6000, por ello se supone que su deformación es limitada, lo que se traduce a la incapacidad de embutir el material. Por esta razón se propone hacer un recocido y evaluar las propiedades antes y después de dicho tratamiento.

En base a la publicación de (*Šlapáková Poková, 2014*) se determina que para un recocido parcial es necesario mantener el aluminio a una temperatura de 425°C durante un tiempo de 40 min para evitar el crecimiento de grano.

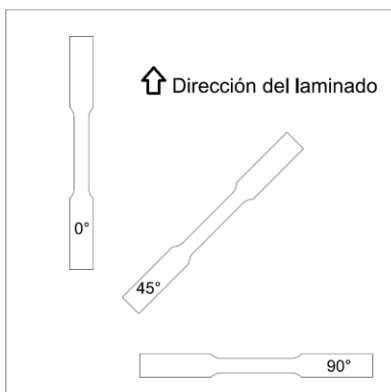


Figura 2.12 Direcciones en las cuales se caracterizó de lámina de aluminio.

En la experimentación se pretende trabajar con dos calibres para analizar el efecto del claro, pero como se comentó en la primera sección de este trabajo, el claro es una variable de diseño y de proceso. En este caso se deja un claro para trabajar con lámina de calibre 18, sin embargo, al usar una lámina calibre 20 aumenta el claro entre punzón y matriz el cual, se traduce en una variable del proceso. Por esta razón en la caracterización de lámina se generaran 9 probetas por cada calibre dando un total de 36 probetas.

Las probetas se generaran en una máquina de control numérico para asegurar mayor precisión en el área calibrada (Figura 2.13), en base al diseño del

Anexos A, siendo este una adaptación a la norma *ASTM E 8M-04*, la cual parte de medidas mínimas para generar las probetas.

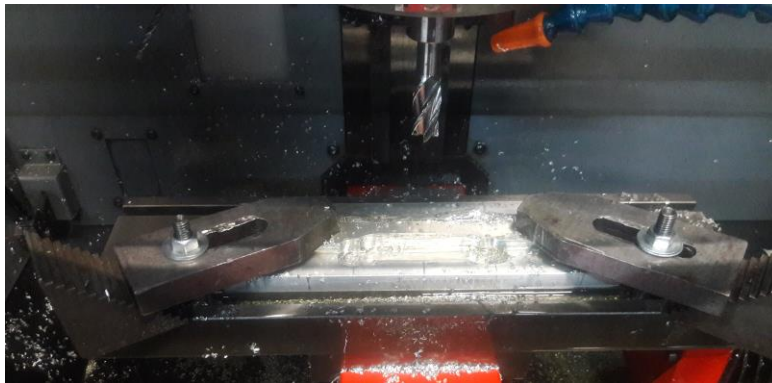


Figura 2.13 Generación de probetas con CNC.

Una vez generadas las 36 probetas se continúa con un desbaste con ayuda de una lija de grano 600 para eliminar las rebabas del proceso de maquinado y a su vez eliminar concentradores de esfuerzos, que pudieran presentarse por el maquinado de las probetas, y al momento de realizar los ensayos en la máquina universal puedan variar de manera significativa los resultados.

Con las probetas maquinadas y la mitad de ellas con un tratamiento de recocido se realizan los 36 ensayos de tracción en una máquina de ensayos universal de la marca *SHIMADZU* (Figura 2.14), la cual cuenta con una celda de carga de 100KN suficiente para caracterizar el material propuesto.



Figura 2.14 Máquina de ensayos universal.

Una vez realizados los ensayos se obtienen graficas de carga desplazamiento ($P-l$), las cuales no dan ninguna información útil ya que son propiedades específicas de las probetas. Es por ello que es necesario generar las gráficas esfuerzo-deformación ($\sigma-\varepsilon$).

Al observar las gráficas de esfuerzo- deformación de las láminas sin recocer tal como se esperaba y se aprecia en las (Figura 2.15) y (Figura 2.16), la anisotropía del material es muy marcada debida a la orientación preferencial dada por el proceso de laminado (tratamiento H14), y también se aprecia que su deformación es muy pequeña, de alrededor del 3%. Lo cuál para el proceso de embutido se considera perjudicial, ya que es un proceso en el cual lo más importante es una deformación de gran magnitud.

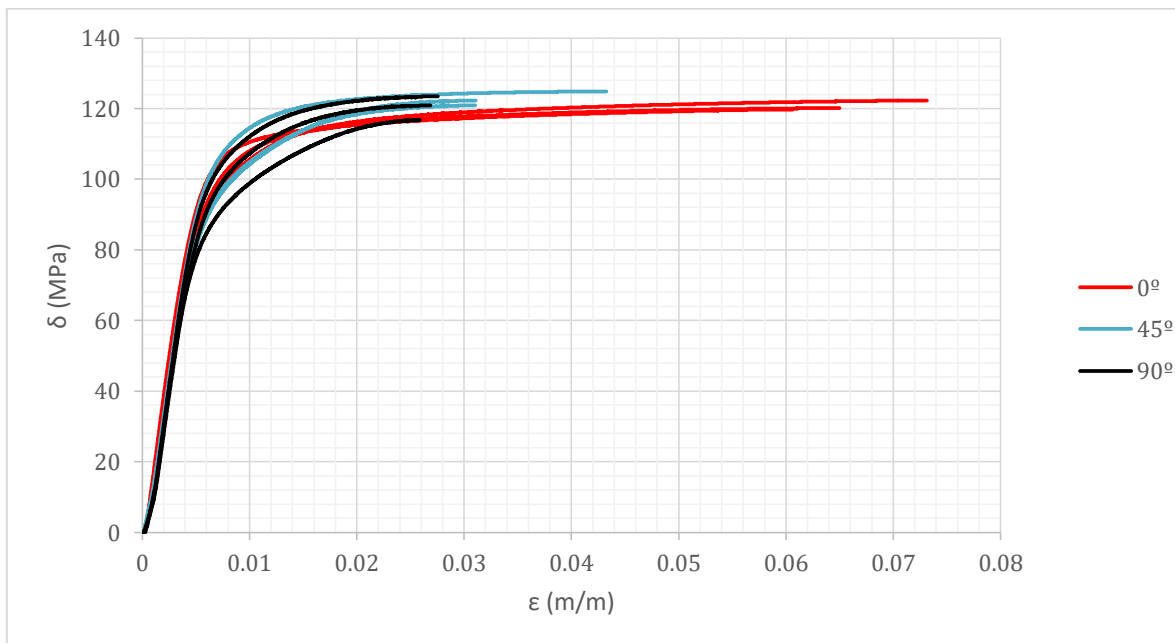


Figura 2.15 Curvas $\sigma-\varepsilon$ de lámina calibre 18

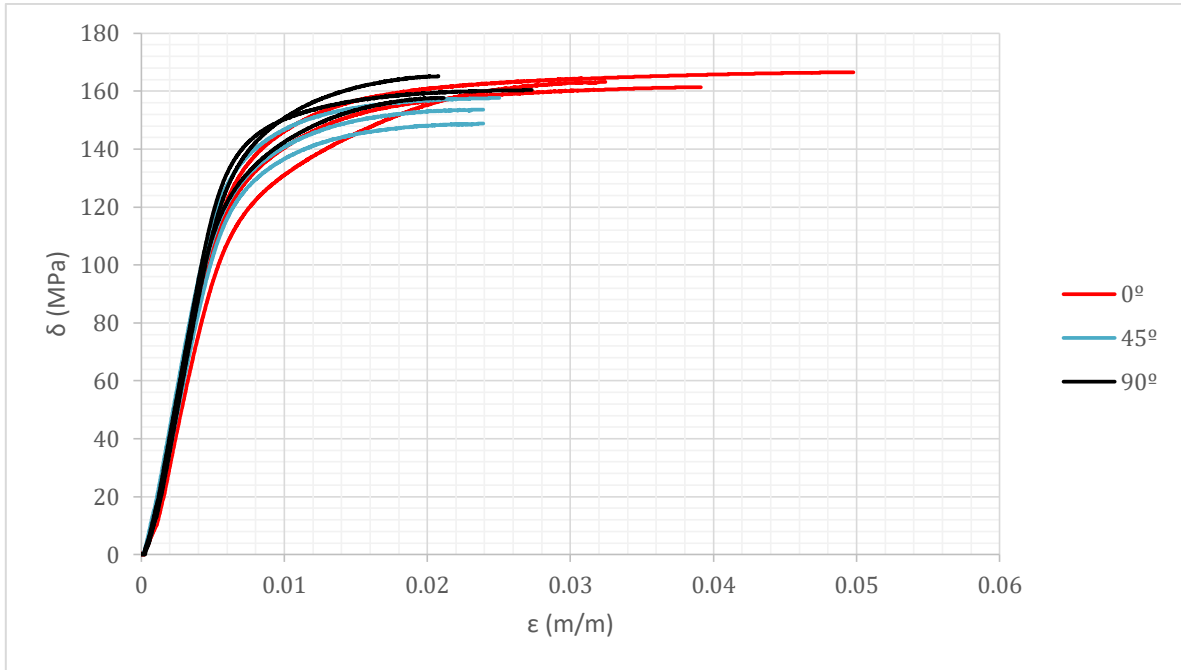


Figura 2.16 Curvas $\sigma - \epsilon$ de lámina calibre 20

En la Figura 2.17 y Figura 2.18 se muestran las gráficas $\sigma - \epsilon$ de las probetas que se someten al tratamiento del recocido. De igual manera, 3 probetas por dirección en sus tres direcciones por cada calibre, para un total de 18 probetas recocidas.

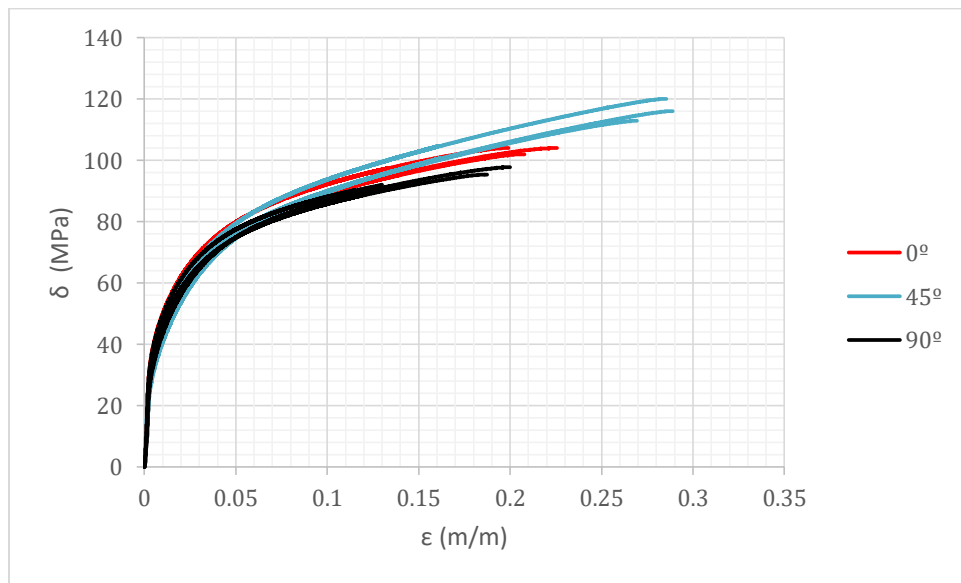


Figura 2.17 Curvas $\sigma - \epsilon$ de lámina recocida calibre 18

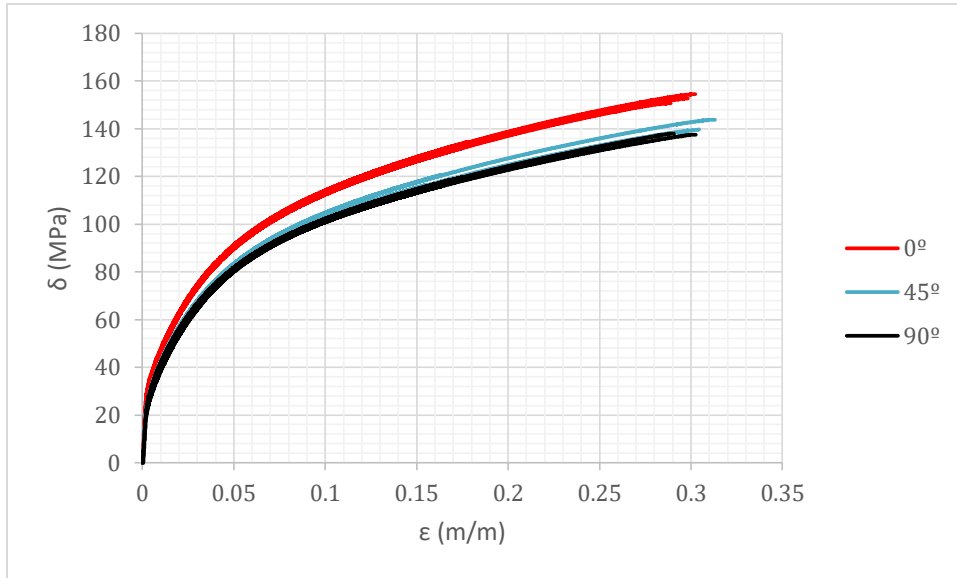


Figura 2.18 Curvas $\sigma - \epsilon$ de lámina recocida calibre 20

Se puede observar que las deformaciones incrementan de manera significativa de menos del 3% a más del 20% de deformación. Esto nos lleva a predecir una mayor capacidad de embutido o en su defecto lograr un embutido que sin el tratamiento de recocido, probablemente no sería posible, asegurando lo anterior, con una predicción a partir de una deformación equivalente calculada de la siguiente manera:

$$\epsilon_{eq} = Ln \frac{85mm}{50mm} * 100 = 53\% \quad 2.1$$

Tomando esta predicción como válida, se aprecia que se encuentra muy alejado de lograr una deformación del 53% con la lámina propuesta. Sin embargo, como se comenta en el capítulo 1, el proceso de embutido no solo está relacionado a un esfuerzo de tracción sino a la combinación de tracción-compresión. Es por ello que se propone experimentar con los 4 tipos de lámina.

En la Tabla 2.2 se resumen de manera cuantitativa las propiedades de las gráficas mostradas anteriormente y que son utilizadas en la siguiente sección para cuantificar la magnitud de la fuerza de embutido.

Tabla 2.2 Propiedades de las láminas caracterizadas.

	Calibre 18	Calibre 20	Calibre 18R	Calibre 20R
T [mm]	1.32	0.86	1.3	0.86
S_{\max} [MPa]	117	155	84	107
S_u [MPa]	116	154	83	106
σ_{ult} [MPa]	121	159	105	143
ε_{ult} [%]	4.26	2.94	22.1	29.7

2.3 Cálculo de la fuerza de embutido

En esta sección se calcula de manera teórica según lo expuesto en el capítulo 1 la fuerza de embutido, y el modelo predictivo de falla. De esta manera se tiene la capacidad de tomar una decisión de donde es más conveniente montar el troquel, ya que se cuenta con la opción de una prensa troqueladora y una máquina de ensayos universal.

Método 1 (*Schuler, 1998*), Expresión 1.7.

$$F_U = \pi \cdot (D_p + t) \cdot t \cdot S_U \cdot 1.2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{\max} - 1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{U18} = \pi(50\text{mm} + 1.3\text{mm})(1.3\text{mm})(116\text{MPa})1.2 \cdot \frac{1.7-1}{2-1} = 20.4\text{KN} \\ F_{U20} = \pi(50\text{mm} + 0.86\text{mm})(0.86\text{mm})(154\text{MPa})1.2 \cdot \frac{1.7-1}{2-1} = 17.8\text{KN} \\ F_{U18R} = \pi(50\text{mm} + 1.3\text{mm})(1.3\text{mm})(83\text{MPa})1.2 \cdot \frac{1.7-1}{2-1} = 14.6\text{KN} \\ F_{U20R} = \pi(50\text{mm} + 0.86\text{mm})(0.86\text{mm})(106\text{MPa})1.2 \cdot \frac{1.7-1}{2-1} = 12.2\text{KN} \end{array} \right.$$

Método 2 (Hosford & Caddell , 1993), Expresión 1.13.

$$F_{MAX} = 2\pi r_1 t \sigma_F \ln \frac{d_0}{d_p}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{MAX18} = 2\pi (25mm)(1.3mm)(121MPa) \ln \frac{85mm}{50mm} = 13.1KN \\ F_{MAX20} = 2\pi (25mm)(0.86mm)(159MPa) \ln \frac{85mm}{50mm} = 11.4KN \\ F_{MAX18R} = 2\pi (25mm)(1.3mm)(105MPa) \ln \frac{85mm}{50mm} = 11.4KN \\ F_{MAX20R} = 2\pi (25mm)(0.86mm)(143MPa) \ln \frac{85mm}{50mm} = 10.3KN \end{array} \right.$$

Método 3 (Fritz, 2013), Expresión 1.15.

$$F_{ZMAX} = \pi D_m t \left[1.1 \frac{K_{fm}}{\eta_f} \left(\ln \frac{D_0}{D_p} - 0.25 \right) \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{ZMAX18} = \pi (50mm + 1.3mm)(1.3mm) \left[1.1 \frac{[1.3(121MPa)]}{0.5} \left(\ln \frac{85}{50} - 0.25 \right) \right] = 20.4KN \\ F_{ZMAX20} = \pi (50mm + 0.86mm)(0.86mm) \left[1.1 \frac{[1.3(159MPa)]}{0.5} \left(\ln \frac{85}{50} - 0.25 \right) \right] = 17.6KN \\ F_{ZMAX18R} = \pi (50mm + 1.3mm)(1.3mm) \left[1.1 \frac{[1.3(105MPa)]}{0.5} \left(\ln \frac{85}{50} - 0.25 \right) \right] = 17.7KN \\ F_{ZMAX20R} = \pi (50mm + 0.86mm)(0.86mm) \left[1.1 \frac{[1.3(143MPa)]}{0.5} \left(\ln \frac{85}{50} - 0.25 \right) \right] = 15.8KN \end{array} \right.$$

Método 4 (Kalpakjian, 2006) y (Groover, 2010), Expresión 1.16.

$$F_p = \pi D_p t (S_u) \left[\frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right]$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_{p18} &= \pi(50\text{mm})(1.3\text{mm})(116\text{MPa}) \left[\frac{85\text{mm}}{50\text{mm}} - 0.7 \right] = 23.7\text{KN} \\ F_{p20} &= \pi(50\text{mm})(0.86\text{mm})(154\text{MPa}) \left[\frac{85\text{mm}}{50\text{mm}} - 0.7 \right] = 20.8\text{KN} \\ F_{p18R} &= \pi(50\text{mm})(1.3\text{mm})(83\text{MPa}) \left[\frac{85\text{mm}}{50\text{mm}} - 0.7 \right] = 16.9\text{KN} \\ F_{p20R} &= \pi(50\text{mm})(0.86\text{mm})(106\text{MPa}) \left[\frac{85\text{mm}}{50\text{mm}} - 0.7 \right] = 14.3\text{KN} \end{aligned} \right.$$

Predicción de falla (*Dieter E., 1988*), Expresión 1.11.

$$F_{Max} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_u \pi D_p t = \left\{ \begin{aligned} F_{Max18} &= \frac{2}{\sqrt{3}} (116\text{MPa}) \pi (50\text{mm})(1.3\text{mm}) = 27\text{KN} \\ F_{Max20} &= \frac{2}{\sqrt{3}} (154\text{MPa}) \pi (50\text{mm})(0.86\text{mm}) = 24\text{KN} \\ F_{Max18R} &= \frac{2}{\sqrt{3}} (83\text{MPa}) \pi (50\text{mm})(1.3\text{mm}) = 19\text{KN} \\ F_{Max20R} &= \frac{2}{\sqrt{3}} (106\text{MPa}) \pi (50\text{mm})(0.86\text{mm}) = 16\text{KN} \end{aligned} \right.$$

En la Tabla 2.3 se muestra un resumen de los valores predichos según los modelos mostrados anteriormente.

Tabla 2.3 Cálculo de fuerza teórica

Cálculo de fuerza teórica	Calibre	18	20	18 Recocida	20 Recocida
	Criterio 1 [KN]	20.4	17.8	14.6	12.2
	Criterio 2 [KN]	13.1	11.4	11.4	10.3
	Criterio 3 [KN]	20.4	17.6	17.7	15.8
	Criterio 4 [KN]	23.7	20.8	16.9	14.3

2.4 Rango de trabajo de la fuerza del pisador

Dado que el pisador es diseñado con una rosca, a partir de un torque inicial se determina el rango de la fuerza del pisador, en el que se generan correctamente los embutidos sin defectos, determinando un rango de entre $4.5 - 7.5 lb \cdot ft$, por lo que con ayuda de la Expresión 1.38 se calcula el rango de la fuerza del pisador, a partir de las medidas de la rosca (Anexos B):

$$d_{\max} = 101.6mm$$

$$\text{Profundidad} = 1.59mm$$

$$d_m = 100.01mm$$

$$p = 2.12mm$$

$$\mu = 0.15$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$F_{des} = \frac{2T}{d_m} \left(\frac{\pi \cdot d_m + \mu \cdot p \cdot \sec \theta}{\mu \cdot \pi \cdot d_m \cdot \sec \theta - p} \right)$$
$$\left\{ \begin{array}{l} F_{4.5lb \cdot ft} = \frac{2(6.5N \cdot m)}{0.1m} \left(\frac{\pi \cdot 0.1m + (0.15) \cdot (2.12 \times 10^{-3}m) \cdot \sec 30^\circ}{(0.15) \cdot \pi \cdot 0.1m \cdot \sec 30^\circ - (2.12 \times 10^{-3}m)} \right) = 782N \\ F_{7.5lb \cdot ft} = \frac{2(10.17N \cdot m)}{0.1m} \left(\frac{\pi \cdot 0.1m + (0.15) \cdot (2.12 \times 10^{-3}m) \cdot \sec 30^\circ}{(0.15) \cdot \pi \cdot 0.1m \cdot \sec 30^\circ - (2.12 \times 10^{-3}m)} \right) = 1.22KN \end{array} \right.$$

Obteniendo como resultado un rango de 782N-1.22KN de fuerza, en el pisador; lo cual garantiza un rango de operación con mínimos defectos y sin rupturas de material.

2.5 Análisis de anisotropía y capacidad de embutido en la lámina de trabajo

En esta sección, como se muestra en el capítulo 1, es importante evaluar la anisotropía del material para evaluar la capacidad de embutido del material, cuantificar que lámina es mejor para el embutido y de cierta manera prevenir los

defectos a partir de sus propiedades obtenidas en los ensayos de tracción con la Expresión 1.1:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)}$$

A continuación en las en las siguientes tablas se muestran las medidas de las probetas después de los ensayos de tracción y a partir de ellas el cálculo del valor “r” de cada una de ellas, ordenadas con respecto al ángulo del sentido del laminado, con 3 probetas por dirección.

Tabla 2.4 Cálculo del valor r de lámina calibre 18

Cal18	Ángulo	W0[mm]	t0[mm]	W[mm]	t[mm]	ε_w	ε_t	R	r0,r45,r90
1	0	12.43	1.33	11.62	0.64	-0.067	-0.731	0.092	0.080
2	0	12.43	1.32	11.61	0.49	-0.068	-0.991	0.069	
3	0	12.38	1.31	11.66	0.61	-0.060	-0.764	0.078	
4	45	12.45	1.31	11.97	0.58	-0.039	-0.815	0.048	0.060
5	45	12.44	1.31	11.78	0.65	-0.055	-0.701	0.078	
6	45	12.43	1.32	11.85	0.54	-0.048	-0.894	0.053	
7	90	12.44	1.31	11.89	0.51	-0.045	-0.943	0.048	0.056
8	90	12.38	1.35	11.75	0.44	-0.052	-1.121	0.047	
9	90	12.48	1.31	11.7	0.55	-0.065	-0.868	0.074	

Tabla 2.5 Cálculo del valor r de lámina calibre 20

Cal 20	Ángulo	W0[mm]	t0[mm]	W[mm]	t[mm]	ϵ_w	ϵ_t	R	r0,r45,r90
1	0	12.42	0.87	11.95	0.64	-0.039	-0.307	0.126	0.099
2	0	12.41	0.86	11.99	0.49	-0.034	-0.563	0.061	
3	0	12.46	0.86	12	0.61	-0.038	-0.343	0.110	
4	45	12.46	0.92	11.91	0.58	-0.045	-0.461	0.098	0.083
5	45	12.49	0.86	12.15	0.65	-0.028	-0.280	0.099	
6	45	12.44	0.85	12.14	0.54	-0.024	-0.454	0.054	
7	90	12.41	0.86	12.01	0.51	-0.033	-0.523	0.063	0.044
8	90	12.41	0.85	12.12	0.44	-0.024	-0.658	0.036	
9	90	12.44	0.85	12.26	0.55	-0.015	-0.435	0.033	

Tabla 2.6 Cálculo del valor r de lámina calibre 18 recocido

Cal18R	Ángulo	W0[mm]	t0[mm]	W[mm]	t[mm]	ϵ_w	ϵ_t	R	r0,r45,r90
1	0	12.41	1.31	9.71	0.64	-0.245	-0.716	0.343	0.335
2	0	12.42	1.32	9.57	0.49	-0.261	-0.991	0.263	
3	0	12.43	1.29	9.21	0.61	-0.300	-0.749	0.400	
4	45	12.45	1.3	10.37	0.58	-0.183	-0.807	0.226	0.227
5	45	12.41	1.31	10.28	0.65	-0.188	-0.701	0.269	
6	45	12.42	1.31	10.54	0.54	-0.164	-0.886	0.185	
7	90	12.46	1.29	10.12	0.51	-0.208	-0.928	0.224	0.195
8	90	12.49	1.29	10.49	0.44	-0.175	-1.076	0.162	
9	90	12.47	1.3	10.5	0.55	-0.172	-0.860	0.200	

Tabla 2.7 Cálculo del valor r de lámina calibre 20 recocido

Cal20R	Ángulo	W0[mm]	t0[mm]	W[mm]	t[mm]	ϵ_w	ϵ_t	R	r0,r45,r90
1	0	12.51	0.87	10.68	0.37	-0.158	-0.855	0.185	0.195
2	0	12.36	0.87	10.82	0.51	-0.133	-0.534	0.249	
3	0	12.45	0.85	10.78	0.33	-0.144	-0.946	0.152	
4	45	12.48	0.85	10.09	0.36	-0.213	-0.859	0.247	0.302
5	45	12.44	0.85	10.08	0.45	-0.210	-0.636	0.331	
6	45	12.41	0.85	10.15	0.46	-0.201	-0.614	0.327	
7	90	12.44	0.86	11.23	0.44	-0.102	-0.670	0.153	0.129
8	90	12.43	0.85	11.09	0.37	-0.114	-0.832	0.137	
9	90	12.43	0.86	11.46	0.37	-0.081	-0.843	0.096	

A partir de los valores r se calcula la anisotropía planar y normal según la Expresión 1.2:

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

$$\Delta_r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2}$$

Obteniendo como resultado los siguientes valores mostrados en la (Tabla 2.8) para cada uno de los calibres, antes y después del tratamiento de recocido.

Tabla 2.8 Anisotropía planar Δ_r y normal r_m

	Calibre 18	Calibre 20	Calibre 18R	Calibre 20R
rm	0.064	0.077	0.246	0.232
Δ_r	0.008	-0.012	0.039	-0.140

Según lo escrito en el capítulo 1 las láminas marcadas en azul son las que predicen un tamaño de “orejas” más pequeño por estar más cercanas al valor 0 mientras que las marcadas en amarillo son las láminas con mayor posibilidad de hacer un embutido más profundo al ser un número mayor y más cercano al valor uno, ya que si recordamos un material isotrópico cuenta con $\Delta r = 0$ y $r_m = 1$.

2.6 Implementación del troquel de embutido en una máquina de ensayos universal.

Como se aprecia en la sección anterior todos los modelos de predicción de fuerza de embutido y el criterio de falla, están por debajo de los 30 KN, lo cual se encuentra dentro del rango de máquina de ensayos universal, la cual tiene como ventaja, poder controlar la velocidad a diferencia de la prensa mecánica. Por esta razón se montó el troquel de embutido en la máquina de ensayos universal (Figura 2.19), sin embargo para ello es necesario realizar un banco que ayuda a desahogar del material y una espiga la cual tiene que ser adaptada a la rosca con la que cuenta la máquina de ensayos universal.



Figura 2.19 Troquel de embutido en máquina de ensayos universal.

3 Análisis de resultados

3.1 Fuerza de embutido

Todas las ocasiones en que un troquel es montado en la prensa donde va ser utilizado, es necesario verificar la alineación entre los herramientales para evitar colisiones y a su vez daño en los componentes. Es necesario también hacer corridas en vacío y verificar que todo se encuentre de manera correcta antes de empezar a realizar pruebas.

Una vez realizado lo anterior se toman las mediciones de 4 muestras por cada tipo de lámina, para finalmente obtener un promedio de la fuerza de embutido experimental, los cuales se muestran a continuación:

$$F_{EXP} = \begin{cases} F_{EXP18} = 20.7 KN \\ F_{EXP20} = 15.4 KN \\ F_{EXP18R} = 21 KN (FRACTURA) \\ F_{EXP20R} = 13.8 KN \end{cases}$$

En la Tabla 3.1 se muestra una comparativa del porcentaje de error promedio en base a cada uno de los modelos predictivos de la fuerza de embutido mostrados en el capítulo 1.

Tabla 3.1 Porcentaje de error en los modelos predictivos

Cálculo de fuerza teórica	Calibre	18	20	18 Recocida	20 Recocida	Promedio de % de error
	Criterio 1 [KN]	20.4	17.8	14.6	12.2	9.5
	Criterio 2 [KN]	13.1	11.4	11.4	10.3	29.4
	Criterio 3 [KN]	20.4	17.6	17.7	15.8	10.1
	Criterio 4 [KN]	23.7	20.8	16.9	14.3	17.7

En consecuencia a lo mostrado anteriormente se concluye que la Expresión 1.7 (Schuler, 1998) (criterio 1) es quien tiene un menor porcentaje de error promedio, que es de alrededor, de un 9% sin incluir los embutidos del calibre 18 recocido ya que la totalidad de ellos no fueron capaces de ser embutidos (Figura 3.1).



Figura 3.1 Embutido de calibre 18, 20, 18R y 20R respectivamente.

3.2 Criterio de falla en embutidos

Como se presentó en el capítulo 1 (Dieter E., 1988) asegura que usualmente la falla del material ocurre en la banda angosta del material en la pared de la copa, justo arriba del radio del punzón, donde se somete a un embutido no radial o doblado, pero es sometido esencialmente a esfuerzos de tracción. En ese anillo entre la pared de la matriz y el punzón el metal es sometido esencialmente a esfuerzos planos de estirado y adelgazamiento. Por lo que la falla ocurre cuando el esfuerzo es aproximadamente igual al esfuerzo de tracción incrementado por el factor de esfuerzo plano según la Expresión 1.11. Dando como resultado la fuerza máxima que soporta el material antes de la fractura.

$$F_{Max} = \frac{2}{\sqrt{3}} S_u \pi D_p t = \begin{cases} F_{Max18} = 27KN \\ F_{Max20} = 24KN \\ F_{Max18R} = 19KN \\ F_{Max20R} = 16KN \end{cases}$$

Tal como se aprecia al comparar la fuerza máxima y la fuerza de embutido, al momento de embutir la lámina de calibre 18 recocida, esta alcanza una fuerza máxima de embutido de 21KN la cual es mayor a los 19KN del modelo predictivo de falla, por lo cual, como lo menciona (Dieter E., 1988) se tiene como resultado una fractura justo en la banda del radio, (Figura 3.2) la cual es detectada por la máquina de ensayos universal, al generarse un adelgazamiento excesivo y una caída abrupta en la fuerza.



Figura 3.2 Fractura de calibre 18 recocido

3.3 Análisis de espesores

En el análisis de espesores, debido a que se trata de un proceso el cual influyen esfuerzos de compresión y tracción, la variación de los espesores no es homogénea debida a la anisotropía del material y esto es propio del proceso a menos que se realice una operación de “ironing” o planchado, donde el claro entre punzón y matriz es menor al espesor de la lámina y en ese caso; se obliga al material a tener un espesor constante, sin embargo, no es lo que se pretende en este estudio.

En las Figura 3.3 y Figura 3.4 se observa que la variación del espesor no es considerable a lo largo de la periferia de la copa en el calibre 18, ya que las variaciones de adelgazamientos y ensanchamientos son de alrededor de 3% tomando como referencia los valores extremos. Sin embargo, en la del calibre 20 se aprecia que al ser mayor el claro entre punzón y matriz, se presentó un incremento en el espesor de la pared de alrededor del 12% ya que al no tener una limitante entre los herramientales no es obligado a mantener el espesor inicial. Sin embargo, es importante mencionar que el producto final tiene un mejor acabado y menos tamaño de “orejas”.

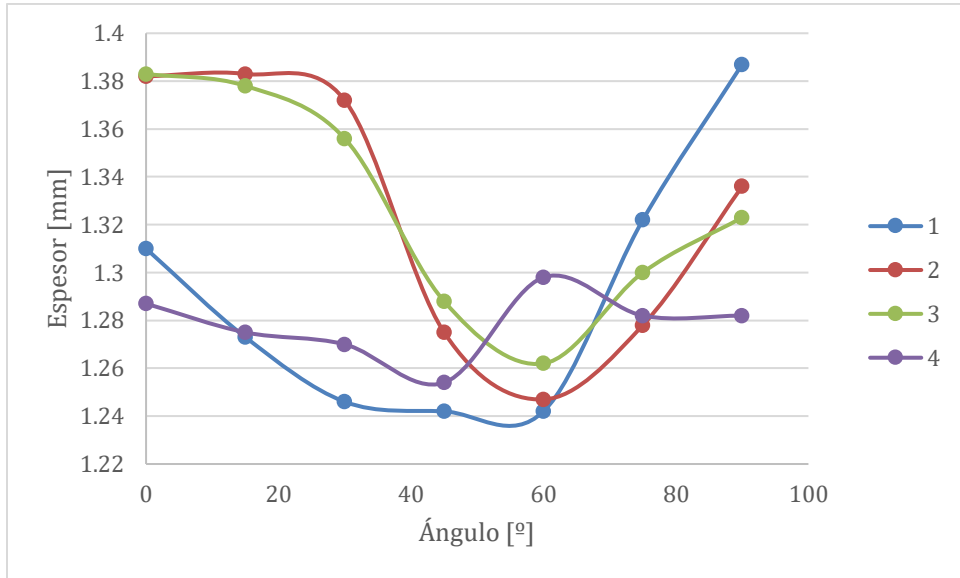


Figura 3.3 Espesores calibre 18

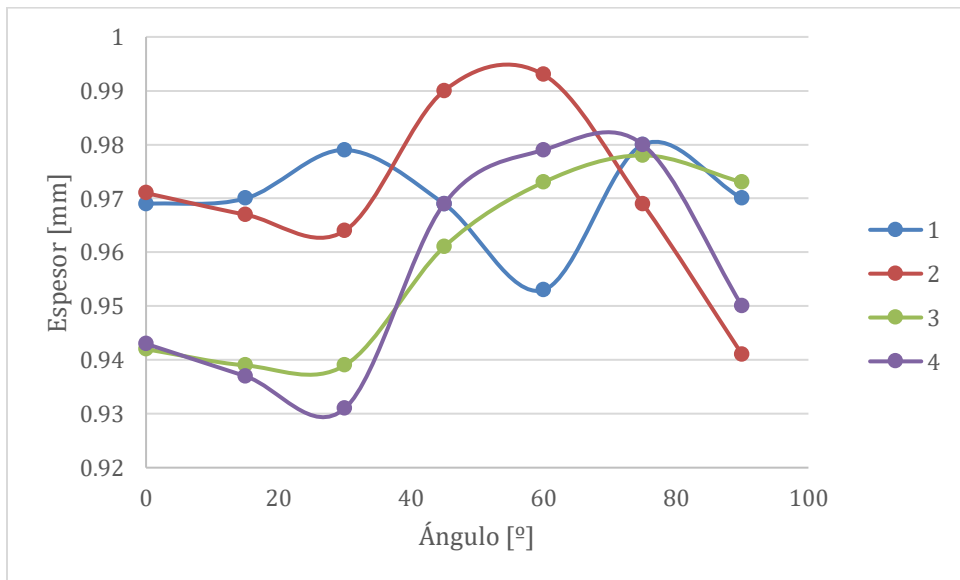


Figura 3.4 Espesores calibre 20

3.4 Tamaño de “orejas”

Para analizar el tamaño de “orejas”, se midieron las alturas en una mesa de coordenadas (Figura 3.5) partiendo del ángulo de 0° a partir del sentido de laminado y concluyendo a los 90° por simetría propia del proceso.



Figura 3.5 Medición de altura de “orejas”.

Teniendo como resultado un promedio de las cuatro muestras por calibre lo cual se muestra a continuación:

$$\Delta h = \frac{h_e - h_d}{0.5(h_e + h_d)} \times 100\% = \begin{cases} \Delta h_{18} = 4.34\% \\ \Delta h_{20} = 1.95\% \end{cases}$$

Como se aprecia en la Figura 3.6 y Figura 3.7 el calibre 18 es el calibre que cuenta con un porcentaje de “orejas” más grande, esto debido a la anisotropía del material. En la Tabla 2.8 se muestra que la lámina calibre 18 tiene una anisotropía planar más pequeña o cercana al valor 0, sin embargo el calibre 20 se presentó un ensanchamiento en las paredes debido al aumento del claro entre punzón y matriz y esto llevo a disminuir el efecto de “orejas” al no tener una restricción entre los herramientas.

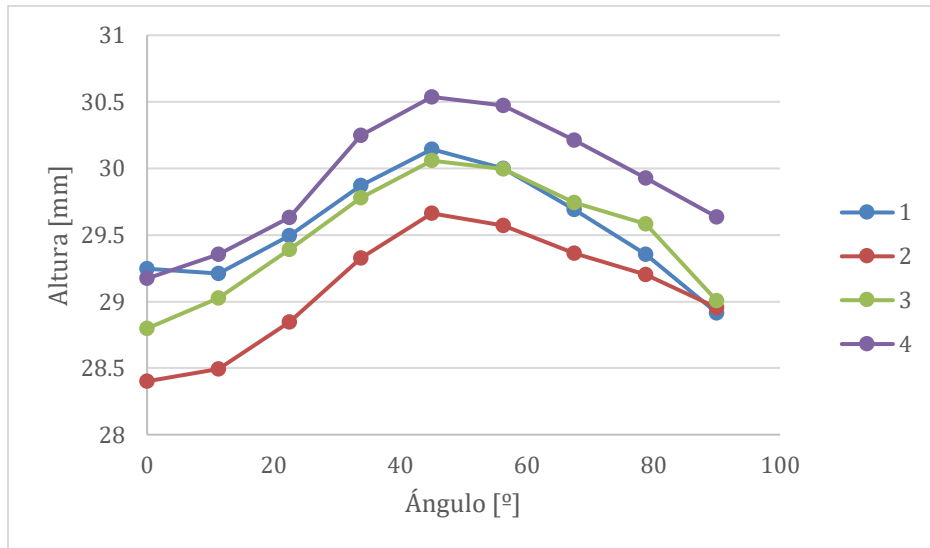


Figura 3.6 Alturas calibre 18

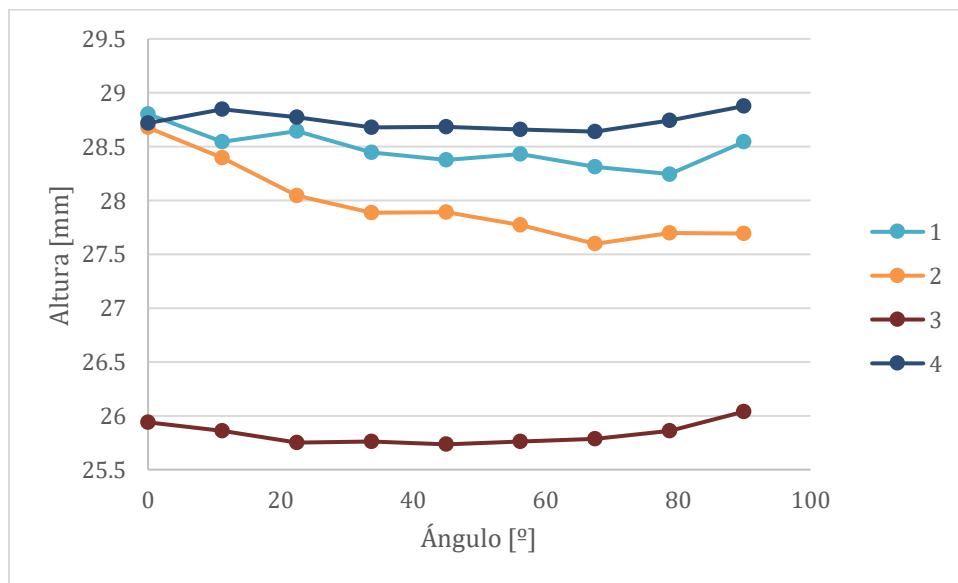


Figura 3.7 Alturas calibre 20

3.5 Comprobación de experimentación en máquina de ensayos universal.

Un factor importante al momento de diseñar un troquel es la velocidad de embutido, la cual si excede los parámetros marcados para el material a embutir causara fisuras debido a un adelgazamiento en las paredes. Estos parámetros no solo dependen del material si no de características del proceso como lubricación

adecuada, precisión de las prensas, simetría de la pieza así como baja severidad del embutido, cuando no se cuentan con los factores anteriormente mencionados, es necesario reducir la velocidad de embutido.

La velocidad de embutido con la cual realizo la experimentación fue de 0.4m/min la cual es menor a la recomendada en (*ASM, ASM Handbook Forming and Forging, 1993*) de 5 m/min, lo cual nos garantiza que la velocidad utilizada no causara fisuras. La mayor parte de las prensas hidráulicas trabaja dentro de estos parámetros: 0.1-23 m/min (*ASM, ASM Handbook Forming and Forging, 1993*). Una ventaja de las prensas hidráulicas es que la velocidad de embutido se puede variar dependiendo de las necesidades de la pieza a embutir.

De acuerdo a los resultados obtenidos de forma experimental y teórica podemos determinar que el tonelaje mínimo de la prensa a utilizar es de 6 toneladas con un factor de seguridad de 2:1, para garantizar que la prensa trabaje en condiciones normales, por lo que la máquina de ensayos es suficiente para realizar el estudio anterior. Por otro lado utilizar una prensa con una mayor capacidad es factible mientras no se rebase la velocidad de embutido propuesta mencionada anteriormente, sin embargo sería un desperdicio ya que no se estaría ocupando toda la capacidad de la máquina y de energía.

Es importante recalcar que los herramentales fueron diseñados para ser utilizados tanto en una prensa mecánico como en la máquina de ensayos universal, por lo que el efecto de la velocidad también podrá ser analizado a futuro.

4 Conclusiones

Como primera parte se concluye que el diseño y manufactura del troquel de embutido, para la implementación de ensayos *Erichsen* fueron exitosos, ya que se logró generar los herramentales con medidas y tolerancias que cumplieran con la norma *DIN EN 1669*. Lo cual, lo hace apto para medir la capacidad de embutido de los materiales, con la ventaja ser versátil en su acoplamiento a una prensa mecánica o a una máquina de ensayos universal, que es con lo que cuenta la Facultad de Ingeniería actualmente. Dando oportunidad que futuro se pueda analizar el efecto de la velocidad de deformación en el embutido.

Como conclusión de la parte la experimental se tiene:

1. Se observó que la deformación equivalente no es factible para predecir que un embutido pueda ser realizado, ya que no se cumple como una predicción de capacidad de embutido. Esto debido a que al calcular dicha deformación como un criterio de falla, se predice una deformación mínima del 53% para garantizar un correcto embutido, sin embargo al momento de realizar la experimentación se observó que las láminas son capaces de ser embutidas con una deformación última del 3-30% según la caracterización antes y después del proceso de recocido, respectivamente.
2. El tratamiento de recocido, en el caso teórico se concluye que las propiedades de la chapa metálica mejoran en la capacidad de embutido del material ya que aumenta el valor de la anisotropía normal de 0.06 a 0.25, por otro lado se predice también un tamaño de “orejas” mayor al aumentar la anisotropía normal de 0.008 a 0.04. Sin embargo, en la experimentación no se cumple dicha predicción ya que aparentemente la configuración seleccionada de los herramentales impiden comprobarlo, debido a que se presentan varios inconvenientes:
 - Como primera parte el pisador cuenta con una precarga muy pequeña en un inicio para lograr los embutidos sin fractura ni defectos, sin embargo, a medida que el embutido avanza, la naturaleza del proceso lleva a comprimir el material en el diámetro exterior y lo reduce en uno

más pequeño, por lo que el material tiende a ensancharse. Sin embargo, el pisador al tener una restricción de movimiento en el eje z, por el diseño del mismo, se tiene entonces que la fuerza del pisador se va incrementando de manera significativa durante el embutido y en el caso de la chapa de calibre 18 recocida, esto impide que fluya el material, lo cual tiene como consecuencia un aumento en la fuerza y por consiguiente la fractura. Cumpliendo así de manera satisfactoria el criterio de falla propuesto por (*Dieter E., 1988*).

- Por otro lado resulta por demás evidente que al aplicar el tratamiento de recocido aumenta de manera significativa la deformación, mientras que: también se manifiesta una disminución de los esfuerzos máximo, cedencia y último, por lo que la lámina demanda una menor carga en el pisador para su correcto embutido, lo cual no puede ser desarrollado, debido al diseño seleccionado.

Como consecuencia, la capacidad de embutido de la lámina se vio reducida por efecto del tratamiento térmico, situación que aparentemente resulta contraria a lo que la teoría predice. Para conseguir demostrar lo establecido teóricamente es necesario que el pisador, vaya ajustando la carga aplicada de acuerdo a lo demandado en el proceso.

3. Para los ensayos realizados en lámina de calibre 18 con tratamiento de recocido, se observa que se incrementa el espesor en un 8% en la zona de la “pestaña” (sección que tiene contacto con el pisador) durante el proceso de embutido, lo cual facilita una fractura justo en la banda del radio (inicio de la sección cilíndrica), Figura 3.2.
4. En el caso de los experimentos realizados con chapa recocida calibre 20, al no aplicar carga en el pisador, en un inicio, (esto es con el pisador sin apriete), de tal forma que la fuerza del pisador sea solo por efecto del incremento del cambio en su espesor, esto en la zona en contacto con el pisador. Como es ya de dominio público se presentan embutidos con ligeras “arrugas” en las paredes (Figura 4.1), sin embargo al aumentar la fuerza del pisador se produce la fractura, además de aumentar el tamaño

de “orejas”, lo cual permite concluir que el recocido, en este caso no ayuda ni en el acabado ni en la eficiencia del material.



Figura 4.1 “Arrugas” en el interior de la copa de chapa recocida calibre 20.

5. Como conclusión se puede afirmar que la configuración seleccionada para el ensayo *Erichsen* es funcional para materiales con esfuerzo ultimo mayores a 115 Mpa. Lo que nos permite medir una gran variedad de materiales entre ellos la familia de los aceros, la cual es ampliamente utilizada en procesos de embutido.

Aunque la experimentación se limita con la serie de aluminio 3000, abre un campo de oportunidades para otros materiales.

Recomendaciones y trabajos futuros

En esta sección se propone indagar en la investigación de los materiales ya que en la literatura no se encuentran modelos para predecir la falla en un proceso de embutido, o las propiedades necesarias en específico que garanticen el embutido de un material. Es por ello que se invita a generaciones futuras que den continuidad a este proyecto, en donde se propone como primera línea de investigación: las aleaciones que son designadas para uso exclusivo de embutido como la serie 5000 y 6000 de aluminio.

También se propone que a partir de modelado de elemento finito, se compare la experimentación con modelos anisotrópicos y se asegure que se tiene la capacidad de predicción de falla en distintos materiales o aleaciones.

Por último y más importante como resultado de esta experimentación. Se sugiere generar una prensa la cual cuente con sistemas de control para la fuerza del pisador y el pistón de manera independiente, ya que en un inicio se indago la configuración antes mencionada, esperando una fuerza de pisador constante, lo cual no se cumplió. Sin embargo es necesario contar con equipo multidisciplinario para tener la capacidad de generar componentes los cuales puedan controlar principalmente dos aspectos: la velocidad constante del pistón y fuerza constante en el pisador pese al ligero ensanchamiento del material al momento de generarse el embutido. Esto a partir de neumática en la parte del pisador la cual da la posibilidad de tener una presión constante y en consecuencia una fuerza constante en el pisador, mientras que en el pistón (punzón) con hidráulica es posible mantener un tener flujo constante el cual da como resultado una velocidad constante al realizar el embutido. De esta manera también es posible obtener las fuerzas de embutido y del pisador sin la necesidad de celdas de carga lo cual muchas veces son los componentes de mayor costo al momento de instrumentar una prensa.

Como conclusión se puede decir que hay mucho por hacer en incontables aspectos mecánicos, que con ayuda de equipos multidisciplinarios y la tecnología con la que se cuenta hoy en día, es posible llegar a controlar y optimizar muchos procesos que a su vez promueven el trabajo en equipo que en muchas ocasiones como estudiante no se desarrollan estas habilidades.

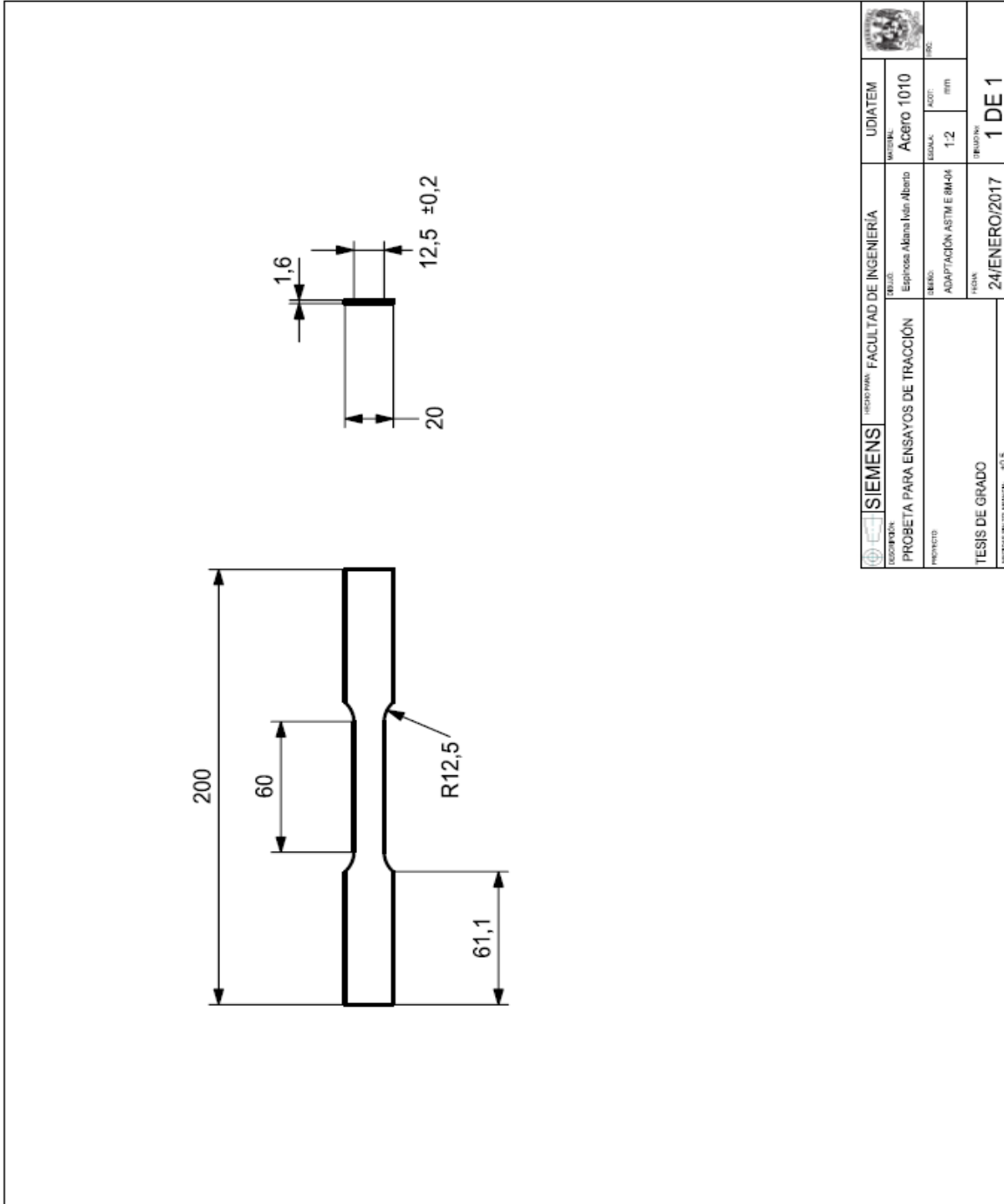
Referencias

- ASM. (1993). *ASM Handbook Forming and Forging* (9th ed., Vol. 14). ASM International.
- ASM. (2000). *ASM Handbook Mechanical Testing* (Vol. 8). ASM International.
- Datos abiertos de México*. (2018). Recuperado el 14 de diciembre de 2018, de Sector metalmecánico (importancia comercial): https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/330048/TLCUEM_ficha_Metalme_canico.pdf
- Dieter E., G. (1988). *Mechanical metallurgy*. UK: McGraw-Hill.
- Fritz, K. (2013). *Manufacturing Processes 4, Forming*. Springer.
- Giese , M. (2017, diciembre 20). *Reportero Industrial*. Retrieved diciembre 13, 2018, from Medir, analizar e innovar: <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Medir,-analizar-e-innovar+123290?pagina=1>
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (4th ed. ed.). United States of America : John Wiley & Sons.
- Hill, R. (1998). *Miscellaneous topics, in: The mathematical theory of plasticity*. USA: Oxford Classics series.
- Hosford, W., & Caddell , R. (1993). *Cupping, redrawing and ironing in: metal forming, mechanics and metallurgy*. (2nd Ed. ed.). USA: PTR Prentice-Hall inc.
- Kalpakjian, S. (2006). *Manufacturing engineering and technology* (5th edition ed.). United States of America: Prentice Hall.
- Kistler. (2013). *Instruction manual DynoWare*.
- Marín Villar, C. (2009, mayo-julio). Troqueles y troquelado, para la producción de grandes series de Piezas. *Metal Actual, XII*.

- Paquin, B. (1962). *Die design fundamentals* (1st ed.). New York, United States of America: Industrial Press.
- Ramírez Toledo , M. Á. (2016). *Validación de un código de elemento finito para plasticidad anisotrópica mediante ensayos en productos metálicos laminados*. México: Tesis doctoral, Instituto de investigaciones en materiales, UNAM.
- Rodríguez Galbarro, H. (2018, 11 20). *ingemecánica*. Retrieved from <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html>
- S. Valberg, H. (2010). *Applied Metal Forming*. New York: Cambridge .
- Sach, G. (1930). *Spanlose forming*. Berlin: Springer-verlag OHG.
- Schuler, G. (1998). *Metal forming handbook*. Berlin: Springer.
- Šlapáková Poková, M. (2014). Recrystallization of AA3003 Aluminium Alloy after ECAP During Isothermal Annealing. *METAL 2014*, (p. 5). Brno, Czech Republic, EU.

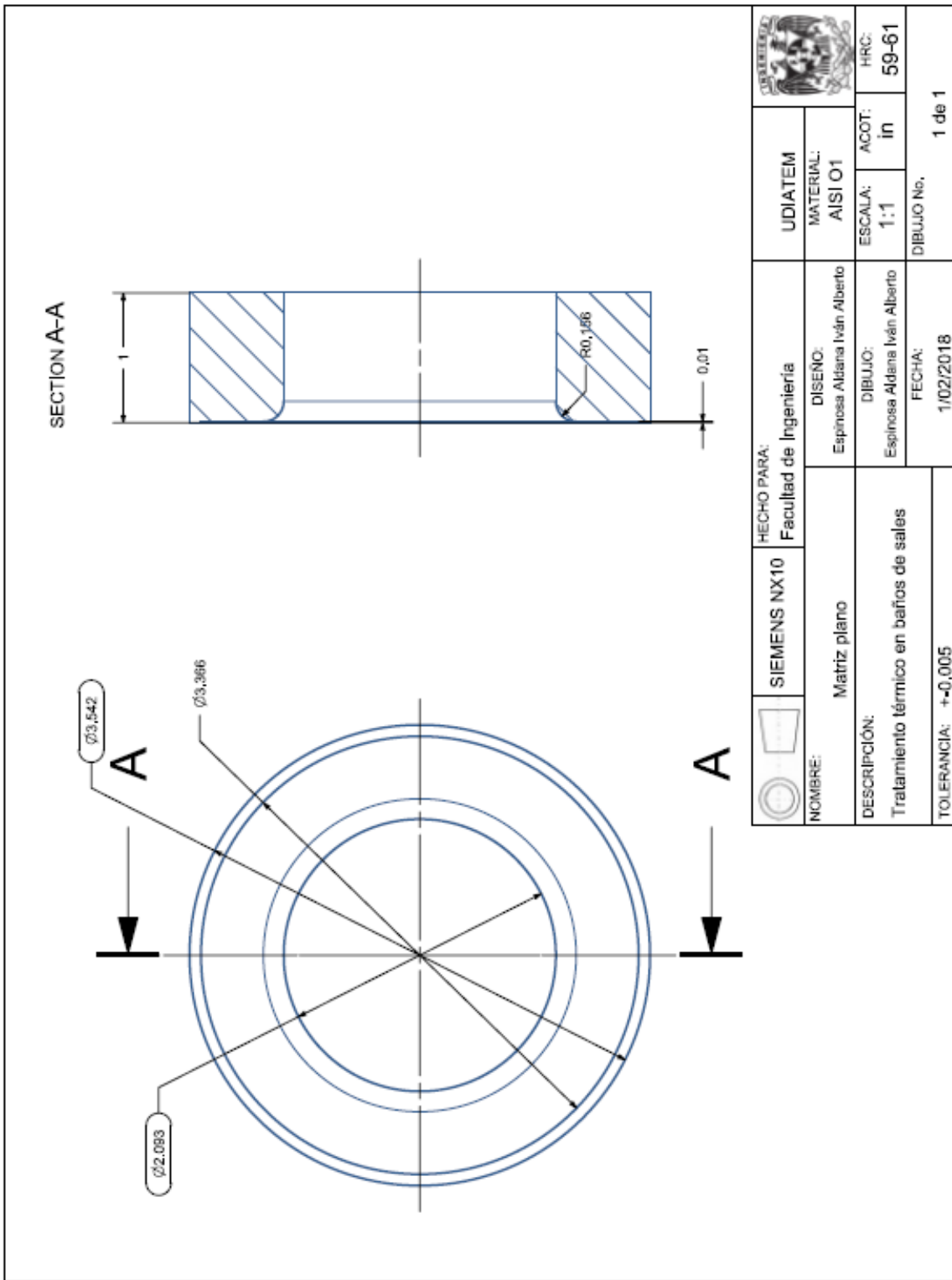
Anexos

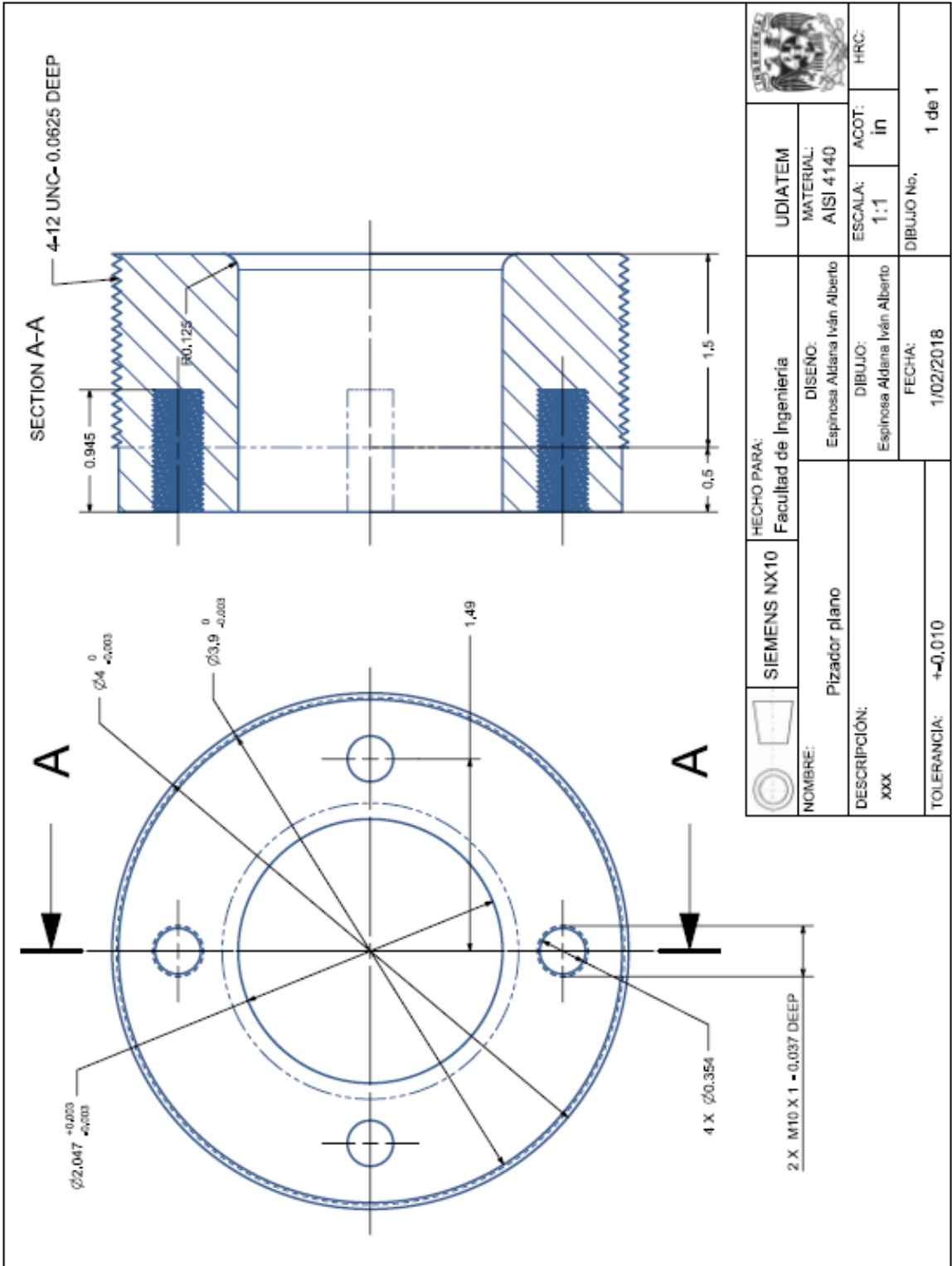
Diseño de probetas

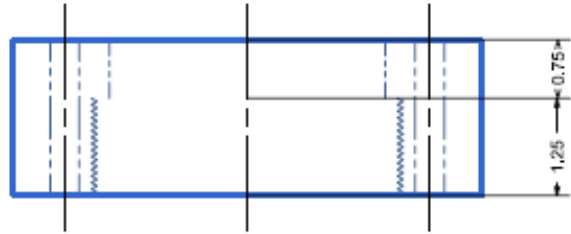
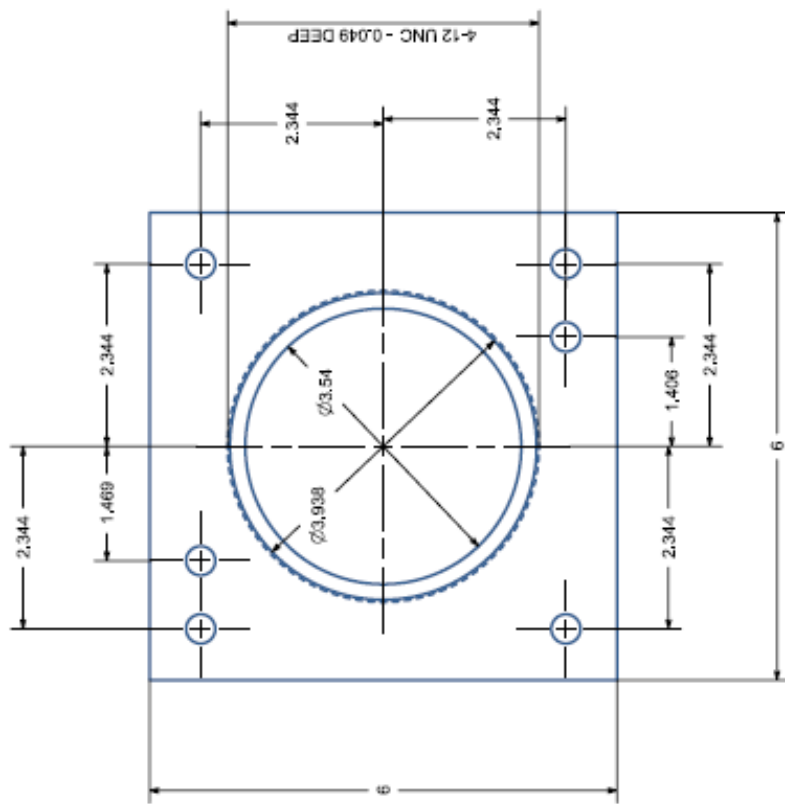




	UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA	FACULTAD DE INGENIERÍA	UDIA TEM				
					UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA		
PROYECTO	PROBETA PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN	PROFESOR	Espejo, Alvaro Iván, Alberto	ACERO 1010			
TEMA	TESIS DE GRADO	SEMESTRE	ADAPTACIÓN ASTM E 8M-04	ESCALA	1:2	UNIDAD	mm
FECHA	24/ENERO/2017	PÁGINA	1 DE 1				

Dibujos mecánicos de herramientas

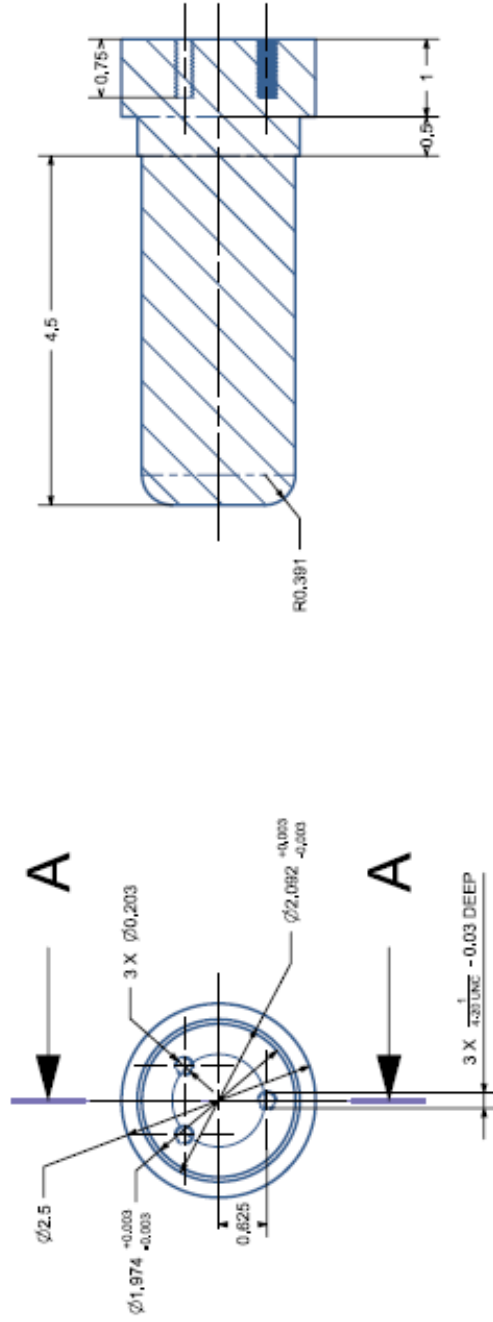








	HECHO PARA: Facultad de Ingeniería				
	SIEMENS NX10		UDIATEM		
NOMBRE: Porta punzón y matriz plano		DISEÑO: Espinosa Aldiana Iván Alberto		MATERIAL: AISI 4140	
DESCRIPCIÓN: XXX		DIBUJO: Espinosa Aldiana Iván Alberto		ESCALA: 1:2	
TOLERANCIA: ± 0.002		FECHA: 1/02/2018		ACOT: in	
				HRC:	
				DIBUJO No.	
				1 de 1	

SECTION A-A



	SIEMENS NX10 Punzón plano	HECHO PARA: Facultad de Ingeniería		UDIATEM		
		DISEÑO: Espinosa Aldana Iván Alberto		MATERIAL: AISI O1		
DESCRIPCIÓN: Tratamiento térmico en baños de sales		DIBUJO: Espinosa Aldana Iván Alberto		ESCALA: 1:2	ACOT: in	HRC: 59-61
TOLERANCIA: ± 0.010		FECHA: 1/02/2018		DIBUJO No. 1 de 1		