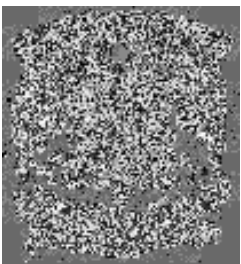


**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

REDISEÑO DE UN HERRAMENTAL DE EMBUTIDO Y SU  
IMPLEMENTACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO ERICHSEN

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO  
P R E S E N T A  
**JAVIER GUZMÁN SEGUNDO**

DIRECTOR DE TESIS:  
M. en C. UBALDO EDUARDO MÁRQUEZ AMADOR



CIUDAD UNIVERSITARIA 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

A la UNAM y a mi D.F. querido.

A los dioses que están ahí, jamás ocultos y siempre conmigo.



A mi familia, amigos, asesores y toda persona que me extendió la mano para concluir este objetivo, gracias totales.

## Índice

<b>Introducción</b>	4
<b>Capítulo I: Proceso de embutido profundo</b>	7
• A) Clasificación de los procesos de conformado	7
• B) Descripción del proceso de embutido profundo	9
• C) Materiales empleados	12
• D) Otras operaciones de embutido	18
• E) Ventajas y desventajas del proceso	18
• F) Aplicaciones industriales	20
<b>Capítulo II: Teoría de embutido profundo</b>	23
• A) Variables	23
• B) Fuerzas de embutido	24
• C) Capacidad de embutido	27
• D) Consideraciones adicionales al proceso de embutido y en general al estampado de lámina	30
<b>Capítulo III: Rediseño y construcción</b>	33
• A) Condiciones iniciales	33
• B) Manufactura y materiales empleados	39
• C) Planos del herramental	44
• D) Montaje del equipo y pruebas preliminares	55
<b>Capítulo IV: Pruebas mecánicas</b>	57
• A) Metodología del ensayo Erichsen	57
• B) Toma de lecturas y resultados en distintas muestras de lámina	59
• C) Obtención del índice de Erichsen y curvas derivadas del ensayo	64
• D) Simulación del ensayo Erichsen por método de elemento finito	66
<b>Capítulo V: Conclusiones</b>	71
<b>Bibliografía</b>	80

## Introducción

Dentro del amplio mundo de la manufactura existen procesos de conformado que son referentes indiscutibles por la gran cantidad de parámetros que existen en torno a ellos y que determinan el éxito o no del proceso, tal es el caso del embutido profundo y en general del estampado de lámina metálica y todas las variantes que se han desarrollado a partir de esta operación: estampado en frío, en caliente o 'hot stamping', embutido con recocido intermedio, embutido en varios pasos, embutido con lubricantes minerales o sintéticos, estirado, rechazado y un largo etcétera.

La necesidad de tener procesos de producción con un mínimo de fallas es imperativo en cualquier sector productivo, es por ello que el ensayo Erichsen se yergue como una opción útil para tratar de conocer con mayor detalle las virtudes que tienen las láminas metálicas para deformarse y producir geometrías cada vez más complejas en tanto que el material tenga una mayor ductilidad sin dejar de lado su resistencia.

El estado del arte de la industria de la transformación de la lámina metálica comúnmente es asociado con el nivel de progreso de la tecnología de la simulación por elemento finito, la cuál se ha constituido indudablemente como el brazo derecho de los encargados de las áreas de diseño y producción. El elemento finito sin duda es una herramienta poderosa que reduce costos al no requerir de prototipos físicos. Sin embargo, alrededor del año 2000 a la fecha se han creado nuevos instrumentos que permiten perfeccionar los procesos de estampado toda vez que el elemento finito no es el alfa y omega del proceso, existen condiciones como la lubricación o la sujeción que cambian radicalmente los resultados en las piezas finales. Al hablar de nuevos instrumentos o nuevas tecnologías nos referimos a la digitalización, la cuál en su nivel más alto permite realizar la inspección, en tiempo real, de las piezas conforme se van fabricando, calculando las deformaciones reales y detectando los puntos críticos en las piezas, o sea, aquellas zonas que tienden a la falla (desgarres, adelgazado extremo, pliegues etc.), causadas en gran medida por el diseño mismo del herramental con que se fabrica.

Aplicando la tecnología de la digitalización y una vez determinados los puntos críticos la información recabada se sincretiza con los resultados procedentes de una simulación de elemento finito. Con los datos reales y los datos simulados se da pie a la denominada *compensación de herramientas*. Esta compensación se calcula en software que traduce los datos físicos y simulados en una deformación de los diseños originales en CAD determinando de esta manera nuevas geometrías que permitirán el

maquinado de nuevas herramientas ajustadas y que impedirán, o por lo menos mitigarán en gran medida, los defectos más recurrentes en las piezas producidas. En pocas palabras, la compensación de troqueles tiene como finalidad mitigar el resorte o *spring back* en los productos derivados del estampado, cosa que por si misma el elemento finito no puede lograr.

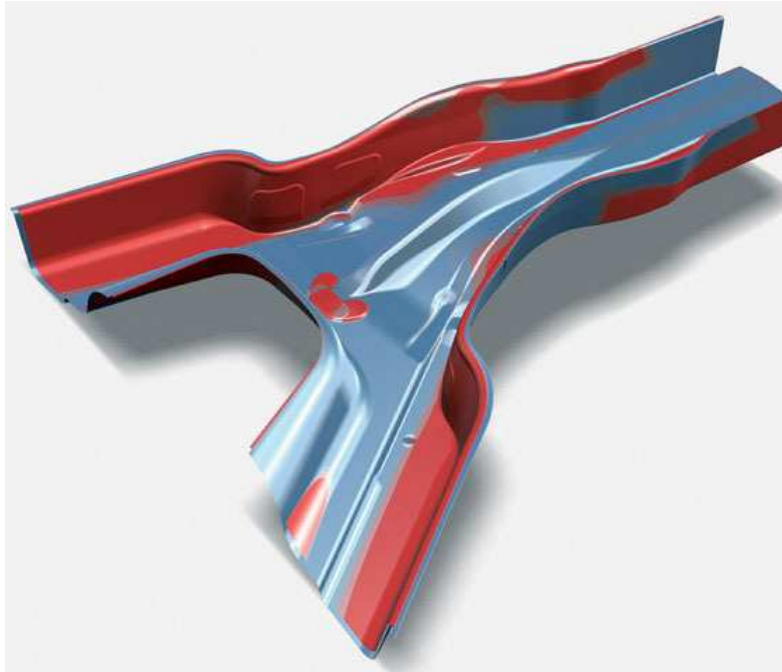


Fig. I.1 Compensación de un modelo CAD en Think Compensador V2010, para revertir 'resorte' o recuperación elástica en una pieza estampada. En rojo aparece el modelo CAD ajustado. En azul el CAD original.

En lo que toca al trabajo que presentamos, éste tiene como finalidad reconstruir un herramental de embutido que fue fabricado en años anteriores, adaptándolo para que sea posible tener las herramientas que permitan practicar el ensayo Erichsen para caracterización de lámina metálica. A grandes rasgos el ensayo Erichsen es un método que es capaz de caracterizar lámina mediante un número (índice de Erichsen) que indica que tan dúctil es el material en relación con muestras procedentes del mismo material (o de otros) en espesores iguales o diferentes. El ensayo es una prueba útil y bastante sencilla que da un panorama general del posible comportamiento de la lámina en procesos de alta deformación, sin embargo, cabe señalar que no es una prueba concluyente ni determinante, la fiabilidad de sus resultados es consecuencia directa de la repetibilidad de los ensayos y de sus condiciones generales tales como velocidad de punzón, lubricación, sujeción, etcétera, lo cual es, en gran medida, responsabilidad de quien ejecute la prueba y procese la información derivada de cada experiencia.

Originalmente el proyecto se había concebido únicamente para reconstruir un herramental y realizar pruebas mecánicas en láminas de distintos materiales, con el tiempo se introdujo la simulación del proceso en elemento finito y hacia la culminación del trabajo se tuvo acceso a la técnica de la digitalización o escaneo de las muestras ensayadas. Con la digitalización pudimos verificar los resultados y así darle una mayor validez al trabajo en su conjunto.

Este trabajo está dividido en cinco capítulos, los dos primeros enfocados a sentar las bases teóricas de procesos de manufactura haciendo énfasis en los procesos de deformación de lámina metálica, particularmente el embutido cuya matemática es útil para comprender el resto de los procesos análogos a él. Los tres capítulos restantes conforman la parte medular de la investigación y tratan acerca de la fabricación del herramental y su estricto apego a la norma que se adoptó como estándar de pruebas, asimismo, también se habla de los resultados obtenidos en los ensayos practicados y la validación de los mismos a través de la inspección de las piezas digitalizadas, redondeando así el trabajo ya que no sólo se certifica la operación del herramental, sino la fiabilidad del conjunto en general, esto es, de la máquina de pruebas, de su interacción con el herramental y de la manera en que fue operada a fin de tener ensayos los más similares entre sí.

Culminaremos esta introducción esperando que toda la información y experiencia condensada en este texto pueda serle útil a cualquier persona cuyo interés se enfoque en el área de los materiales y la manufactura de lámina metálica, sin dejar de lado aspectos y herramientas que enriquecen y fomentan el perfeccionamiento de esta gran vertiente de la ingeniería mecánica, tales como la digitalización y el cada vez más indispensable elemento finito.

## Capítulo I Proceso de embutido profundo

### Objetivo:

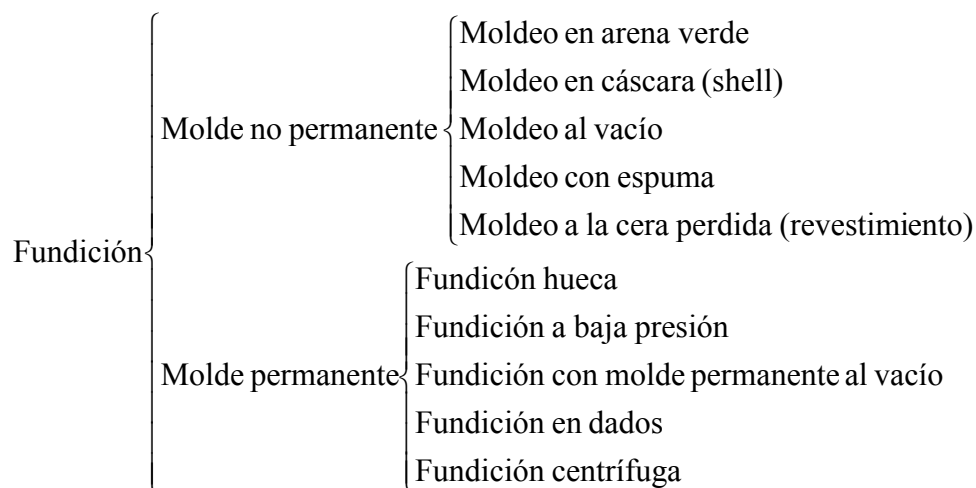
Dar una breve introducción a los procesos de conformado mecánico de materiales haciendo énfasis en el embutido y deformación de lámina metálica en general.

### A) CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CONFORMADO

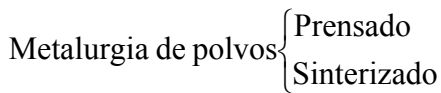
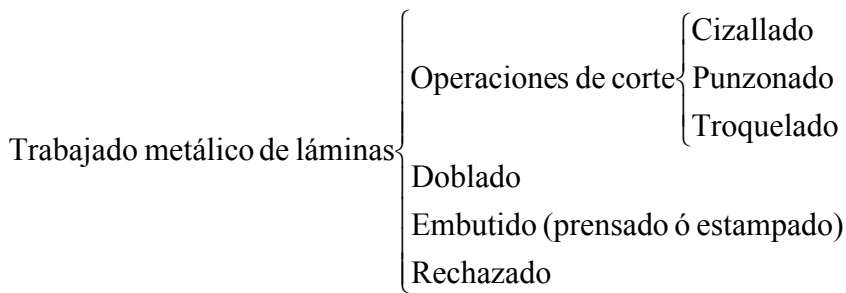
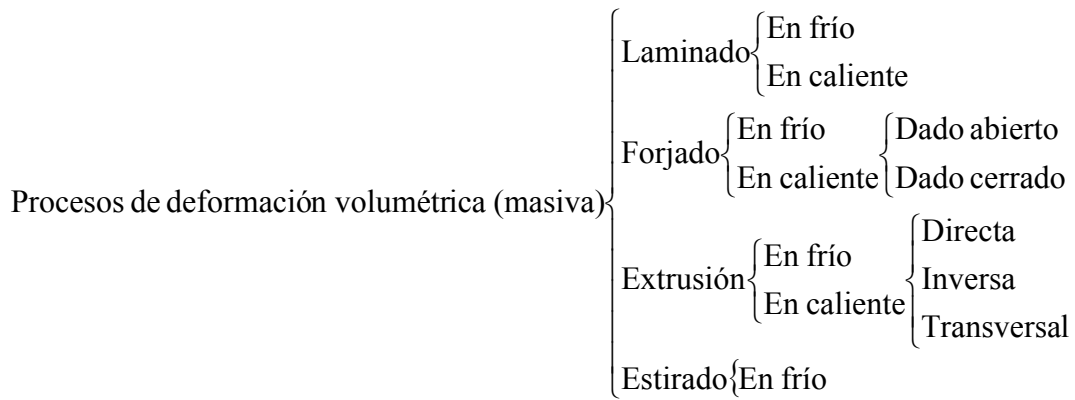
Existe una considerable cantidad de procesos de conformado de materiales, se puede establecer una clasificación de acuerdo a muchos factores, pero principalmente se agrupan de acuerdo a la materia prima con la que se parte o si se trabaja en frío o caliente; así, la fundición es de los metales como la inyección de los polímeros.

Una clasificación más formal puede establecerse de la siguiente manera, la cual ha sido obtenida de

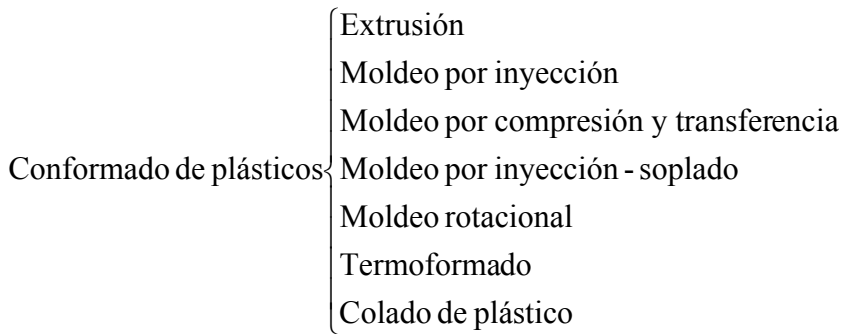
- **Procesos de conformado de metales**



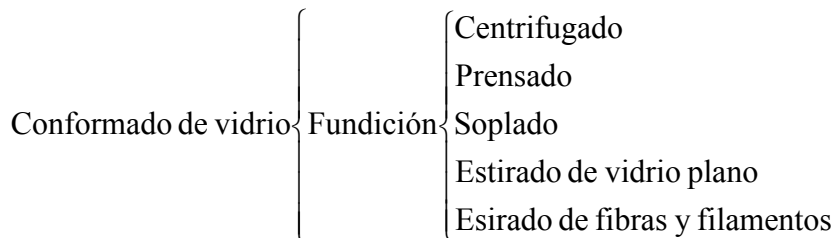




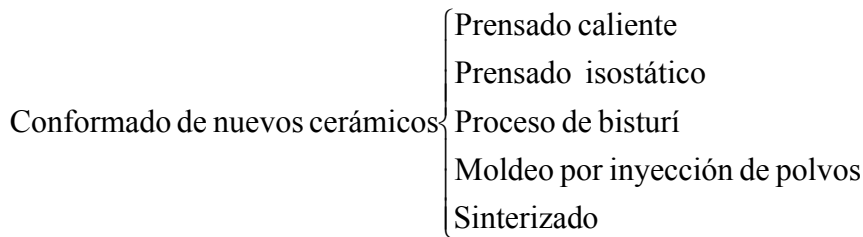
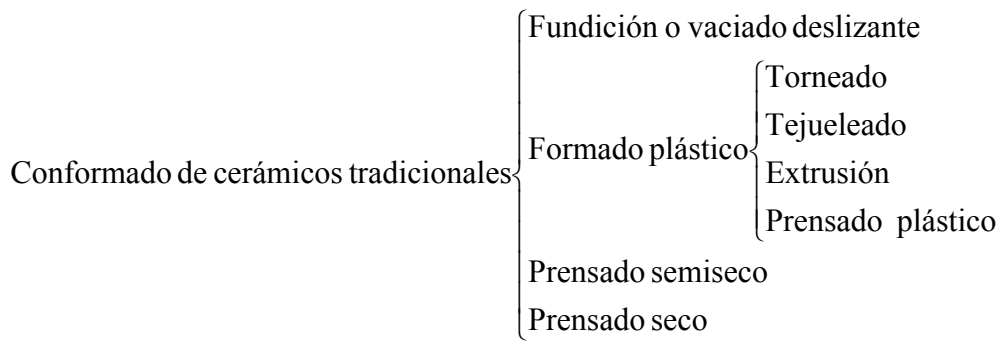
• **Procesos de conformado de plásticos**



• **Procesos de conformado de vidrios**



- **Procesos de conformado de productos cerámicos**



\*Clasificación obtenida de (10)

### B) DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO PROFUNDO

El proceso de embutido es una operación que tiene como principio la deformación plástica de lámina metálica y se emplea para hacer piezas de geometría acopada, de caja y de una gran variedad de formas huecas. El embutido se realiza colocando una lámina de metal aprisionada por un sujetador y un dado empujando el metal hacia la cavidad inferior de éste con la presión ejercida por un punzón. Piezas típicas que se fabrican por embutido son las latas de refresco, utensilios de cocina como cacerolas, partes automotrices etc. En la práctica existen dos posibles métodos para llevar a cabo este proceso: el embutido libre y el embutido con sujetador.

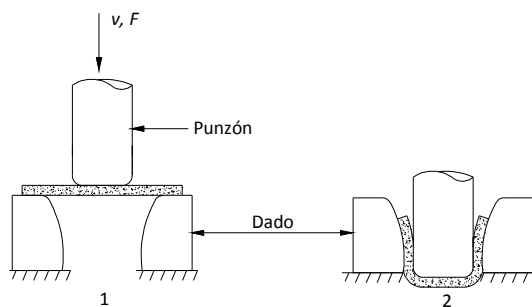


Fig. 1.1. Embutido sin sujetador 1) Antes del embutido 2) Forma obtenida. (8)

La mecánica del embutido se puede explicar a partir del siguiente diagrama.

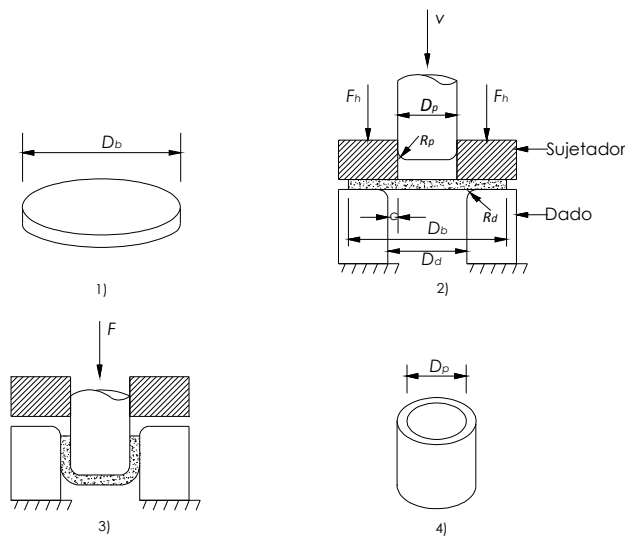


Fig. 1.2. Mecánica básica del embutido. 1) Se parte de un disco de diámetro conocido, 2) Configuración típica del proceso, 3) Deformación del disco, 4) Geometría final. (8)

Se embute un disco (conocido en la industria como 'blank') de diámetro  $D_b$  dentro de la cavidad de un dado de diámetro  $D_d$ , tanto el punzón como el dado tienen unos redondeos en las esquinas ( $R_p$  y  $R_d$ ) que permiten eliminar errores en las piezas finales puesto que al tener esquinas agudas ( $R_p$  y  $R_d = 0$ ) ocasionaría la ruptura del material haciéndose una operación de perforado y no de embutido, es decir, la pieza fallaría por cortante. Es importante señalar que las periferias del punzón y del dado deben estar espaciadas por un claro  $c$ . El claro punzón-dado debe ser aproximadamente 10% mayor que el espesor de la placa a embutir.

El punzón presiona con una fuerza  $F$  hacia abajo a fin de deformar al material y el sujetador ejerce una fuerza de sujeción  $F_h$  en la misma dirección que el punzón. Por cada avance del punzón el material comienza a deformarse plásticamente mediante una serie compleja de dobleces y desdobleces, los esfuerzos en el material son severos y es difícil cuantificarlos de una forma discreta o puntual. El proceso típico de embutido se puede apreciar en la siguiente figura.

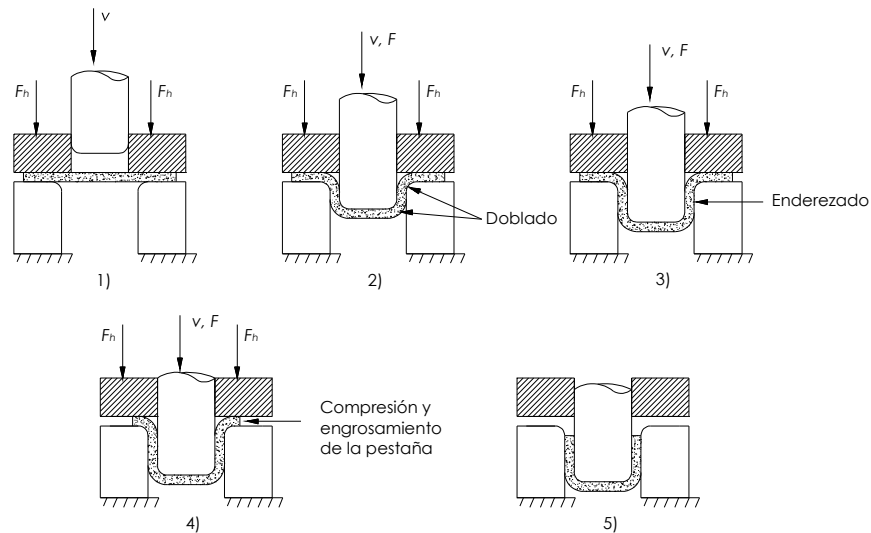


Fig. 1.3. Secuencia del embutido. 1) Herramental montado, 2) Doblado de la forma inicial, 3) Enderezado en las paredes del dado, 4) Compresión de la brida o pestaña, 5) Fin de la carrera del punzón. (8)

A medida que el punzón avanza se genera una reacción que se conoce como de enderezado debido al doblado que ocurrió en los bordes del dado. Tanto el material que existe en el fondo de la copa como el que se encuentra a lo largo del punzón se han desplazado junto con el punzón mismo y el metal que se dobló en la zona entre el sujetador y el dado deben de enderezarse de tal forma que fluyan a lo largo del claro para crear las paredes del cilindro.

En los instantes en el que el punzón comienza descender, el material de la brida (lámina que queda fuera del dado), debe superar la fricción que existe entre el sujetador y el dado que la aprisionan para comenzar a moverse hacia la abertura del propio dado. Existe un momento en que la fricción estática domina el proceso, sin embargo, en el instante en que el metal comienza a desplazarse la fricción dinámica es la única presente. Por ello, parte del éxito del proceso depende en gran medida de la correcta aplicación de las fuerzas de sujeción y de las fuerzas asociadas con la fricción entre las interfases del sujetador-lámina y de la lámina-dado, como consecuencia, este proceso de conformado demanda la aplicación de lubricantes adecuados para disminuir tales fricciones.

Además de la fricción, se presenta un fenómeno asociado al instante en el que el material comienza a desplazarse por el claro. En la parte llamada de las *pestañas* (brida), que es una zona exterior a la forma, existe una compresión. Esta compresión aparece en el momento en el que el metal se estira hacia el centro ocasionando que el perímetro exterior se haga menor, como el volumen del material a embutir permanece constante el metal se comprime y se hace más grueso al reducirse el perímetro. En buena cantidad de ocasiones el fenómeno anterior ocasiona que la brida remanente se arrugue, particularmente cuando la fuerza de sujeción es baja. Se aprecia pues, que la fuerza de sujeción es uno de los parámetros claves del proceso ya que una mala elección de ella puede ocasionar, en el caso de ser muy pequeña, pliegues, si es muy grande puede ocurrir que el metal no fluya como es debido y se presenten desgarramientos y estiramientos indeseables.

Finalmente, y siguiendo con el análisis del desplazamiento del punzón y la respuesta del metal, veremos que a medida que fluye el material se presentará cierto adelgazamiento de las paredes del cilindro o forma. Por consecuencia directa de la tercera ley de Newton, a la fuerza aplicada por el punzón se opone la del metal que se manifiesta mediante la fricción y la deformación de la placa. La deformación en este proceso lleva consigo estiramiento y adelgazamiento del metal al ser embutido dentro del dado. La literatura (10) especifica que en una operación exitosa de embutido puede presentarse hasta un 25% de adelgazamiento en la zona aledaña a la base de la forma.

### **C) MATERIALES EMPLEADOS**

#### **Metales para estampar**

Existe una amplia gama de materiales aptos para procesos de embutido, estampado y estirado. Atendiendo las necesidades del primero, el embutido puede procesar adecuadamente chapa de acero de bajo contenido de carbono, acero inoxidable, latón, cobre y aluminios en general, aleados y no. La siguiente tabla expone las propiedades típicas de los aceros blandos con calidad para embutir.

Quality level	Tensile strength		Yield strength		Elongation, % in 50 mm (2 in.)	Plastic-strain ratio, $r$	Strain-hardening exponent, $n$	Hardness, HRB
	MPa	ksi	MPa	ksi				
Hot rolled								
Commercial quality	358	52	234	34	35	1.0	0.18	58
Drawing quality	345	50	220	32	39	1.0	0.19	52
Drawing quality, aluminum killed	358	52	234	34	38	1.0	0.19	54
Cold rolled, box annealed								
Commercial quality	331	48	234	34	36	1.2	0.20	50
Drawing quality	317	46	207	30	40	1.2	0.21	42
Drawing quality, aluminum killed	303	44	193	28	42	1.5	0.22	42

Tabla 1.1. Propiedad mecánicas típicas de lámina de aceros de bajo contenido de carbono. Metals Handbook. Vol. 14. Novena edición, EUA, 2000.

Dentro de la inmensa gama de aceros para embutido existen dos tipos de los denominados de alta resistencia, aquellos que por sus características a nivel de microestructura o por los procesos de su fabricación o manufactura se convierten en una excelente opción para llevar a cabo procesos exitosos de embutido, dichos aceros son los IF y BH.

## Aceros IF

Los aceros libres de intersticiales son reconocidos como el material con la más alta calidad para aplicaciones de embutido profundo y han sido utilizados en una amplia variedad de productos que van desde estructuras automotrices hasta componentes electrónicos, como también en utensilios caseros.

Los aceros IF fueron desarrollados a partir de los aceros de bajo contenido de carbono, calmados al aluminio (el acero es sometido a un tratamiento mediante la adición de aluminio antes de la colada; gracias a este tratamiento se pueden obtener piezas perfectas, ya que no se producen gases durante la solidificación, evitando la formación de sopladuras) con alta calidad de estirado.

Debido al bajo contenido de carbono (inferior a 80 ppm) y gracias a la adición de elementos micro aleantes como titanio y niobio, el acero IF teóricamente no presenta átomos intersticiales como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno o boro en la red cristalina. Esta particularidad le da a este acero una extraordinaria formabilidad y propiedades de no envejecimiento.

Los aceros libres de intersticiales se caracterizan por tener valores de elongación uniaxial (%E), cociente de anisotropía normal (valor r) y exponente de endurecimiento por deformación (valor n) superiores a los aceros de bajo contenido de carbono ordinarios cuyos valores les permiten una calidad comercial o de estirado, mientras que el acero IF alcanzan valores mayores que les permiten una calidad superior de embutido profundo o embutido extra profundo.

### **Aceros BH (Bake Hardening), aceros de alto límite elástico.**

Estos aceros han sido elaborados y tratados, para conseguir un aumento significativo del límite elástico durante un tratamiento térmico a baja temperatura, tal como una cocción de pintura. La ganancia en su límite elástico conseguida por el tratamiento de cocción, llamado efecto "Bake Hardening" (BH), es generalmente superior a 40 MPa. El efecto "Bake Hardening" ofrece una mejora en la resistencia a la deformación y una reducción del espesor de la chapa para unas mismas propiedades mecánicas.

Los aceros de la gama BH se destinan a piezas de aspecto (puertas, aletas delanteras y techo) y a las piezas de estructura (bastidor inferior, refuerzos, travesaños y paneles interiores).

### **Lubricantes**

Los lubricantes son empleados en todos los procesos de deformación de lámina. El rango de sustancias empleadas es grande y va desde aceites simples para máquina hasta compuestos pigmentados. La selección del lubricante se basa primordialmente en su habilidad para prevenir pliegues y desgarres durante la operación. Actualmente los materiales para el dado son seleccionados una vez que se han hecho varias pruebas usando uno o más lubricantes.

Las siguientes dos tablas exponen los lubricantes mayormente utilizados

Metal being drawn	10% or less	Severity of drawing 25% average	50% or more
Aluminum and aluminum alloys	Straight mineral oil, 100 SUS viscosity(a); mineral oil with approximately 10% lard oil	Straight mineral oil, 200-250 SUS viscosity <sup>(a)</sup> ; mineral oil with approximately 15% lard oil	Mineral oil with extreme-pressure additives--sulfur and others; coating of soap or wax dried on blanks (or shells) prior to drawing (or redrawing)
Copper and copper alloys	5% soap solution; lard and soap emulsion	10% soap solution with stearic or oleic acid; lard oil and mineral oil with stearic acid	Lard oil blended with 50% mineral oil, coating of soap or wax dried on blanks or draws prior to draw or redraw
Carbon steel	Mineral oil, 250-350 SUS viscosity <sup>(a)</sup> ; 5% soap solution	Emulsions of lard oil, mineral oil, and sulfonated oils	Phosphate coating impregnated with dried soap or wax
Stainless steel	Castor oil and soap emulsion	Castor oil with fillers, such as mica or zinc oxide	Boiled linseed oil with mica or lithopone; phosphoric acid etch with dried soap or wax film

Tabla 1.2. Cuando se emplea más de un lubricante, la lista de lubricantes aumenta a fin de incrementar la eficacia del proceso. Metals Handbook. Vol. 14. Novena edición, EUA, 2000.

Type or composition of lubricant	Ease of removal by:		Protection against rusting
	Water-base cleaners	Degreasers or solvents	
<b>Water-base lubricants</b>			
<b>Low severity (10% or less)</b>			
Water emulsion of 5-20% general-purpose soluble oil or wax	Very good	Good	Fair
<b>Moderate severity (11-20%)</b>			
Water solution of 5-20% soap	Very good	Very poor	Fair
Water emulsion of heavy-duty soluble oil (contains sulfurized or chlorinated additives)	Very good	Good	Fair
<b>High severity (21-40%)</b>			
Soap-fat paste, diluted with water (may contain wax)	Fair	Poor	Fair
Water emulsion of heavy-duty soluble oil (contains a high concentration of sulfurized or chlorinated additives)	Very good	Good	Fair to poor
<b>Maximum severity (&gt;40%)</b>			
Pigmented soap-fat paste, diluted with water	Poor	Very poor	Good
Dry soap or wax (applied from water solution or dispersion); may contain soluble filler such as borax	Good	Very poor	Good
<b>Oil-base lubricants</b>			
<b>Low severity (10% or less)</b>			
Mill oil, residual	Good	Very good	Fair
Mineral oil	Good	Very good	Fair
Vanishing oil	Removal not required		...
<b>Moderate severity (11-20%)</b>			
Mineral oil plus 10-30% fatty oil	Good	Very good	Fair
Mineral oil plus 2-20% sulfurized or chlorinated oil (extreme-pressure oil)	Good to fair	Good	Fair to poor
<b>High severity (21-40%)</b>			
Fatty oil	Fair	Fair	Fair
<b>Mineral oil plus 5-50% of:</b>			
Nonemulsifiable chlorinated oil	Poor	Good	Very poor
Emulsifiable chlorinated oil	Good	Good	Very poor
Concentrated phosphated oil	Fair	Fair	Fair
<b>Maximum severity (&gt;40%)</b>			
Blend of pigmented soap-fat paste with mineral oil	Poor	Poor	Fair
<b>Concentrated sulfochlorinated oil (may contain some fatty oil):</b>			
Nonemulsifiable	Very poor	Fair	Poor
Emulsifiable	Good	Fair	Poor
<b>Concentrated chlorinated oil:</b>			
Nonemulsifiable	Very poor	Fair	Very poor
Emulsifiable	Good	Fair	Very poor

Tabla 1.3. Lubricantes mayormente empleados en el embutido profundo de lámina de acero de bajo contenido de carbono. Metals Handbook. Vol. 14. Novena edición, EUA, 2000.



## **Punzón, dados y sujetadores**

Los materiales empleados para punzones, dados y sujetadores para embutido de placa metálica dependen de la composición de la misma, de su tamaño, capacidad de embutido, cantidad de las piezas a embutir, tolerancias y acabados superficiales.

En lo que respecta a los dados existen múltiples configuraciones, pueden ser desde simples, compuestos, de doble acción, progresivos, etc. Los materiales empleados para estos componentes son extensos, la gama va desde casos muy particulares como el empleo de poliésteres, resinas epóxicas, fenólicas o resinas de nylon, hasta lo convencional y de uso más extendido que son los denominados aceros para herramienta, divididos en dos grandes grupos, para trabajo en frío y trabajo en caliente. Para el caso particular de este trabajo resultan de interés los aceros con la denominación D, por ejemplo, acero D2, D3 y D4, los cuales tienen una composición química semejante, sin embargo, el contenido de carbono en cada aleación determina un uso específico para cada acero, brevemente describiremos a cada uno de ellos:

### **Acero D2 (AISI D2)**

Acero de temple al aire que tiene un alto contenido de carbón y cromo y con muy alta resistencia al desgaste y mínimo cambio dimensional después del tratamiento térmico. Por sus propiedades es ideal para la fabricación de dados de alta producción y en las herramientas para trabajo en frío de diseño muy intrincado.

Su composición química básicamente es C 1.5%, Cr 12 %, Si 0.3%, V 0.9%, Mn 0.3%, Mo 0.8%.

Entre sus aplicaciones se puede establecer que es una aleación útil en la fabricación de dados formadores, dados para estampar, dados de estirado , dados de acuñar, dados para cortar lámina, dados de extrusión, dado para rolar, matriz de embutido, dados para punzonar, rodillos trituradores, cuchillas para guillotina.

### Acero D3 (AISI D3)

Acero de temple al aceite con alto contenido de carbón y cromo. Las piezas hechas con este acero llegan a tener muy alta resistencia al desgaste y poco movimiento dimensional al tratamiento térmico. Es muy usado en herramientas para trabajos en frío. Su composición química presenta C 2.1%, Cr 12%, Si 0.3%, Mn 0.3%

Sus aplicaciones abarcan dados de estirado, dados para estampar, dados formadores, dados de acuñación, dados de laminación, dados ribeteadores, cuchillas, matrices de embutido, fresas, dados para cortar lámina.

### Acero D4 (AISI D4)

Acero de temple al aire con alto contenido de carbono y cromo con la propiedad de alcanzar muy alta resistencia al desgaste. Es un acero muy usado para la fabricación de piezas en las que se requiere alta dureza, sin importar su tenacidad o resistencia al impacto. Su composición química presenta los siguientes elementos, C 2.2%, Cr 12%, Si 0.25%, V 0.3%, Mn 0.3%, Mo 0.8%.

Entre sus aplicaciones destacan la fabricación de dados formadores, cuchillas, calibradores, dados para acuñar, rodillos para laminar, dados de extrusión, matrices de embutido, dados para punzonar, dados de estirado.

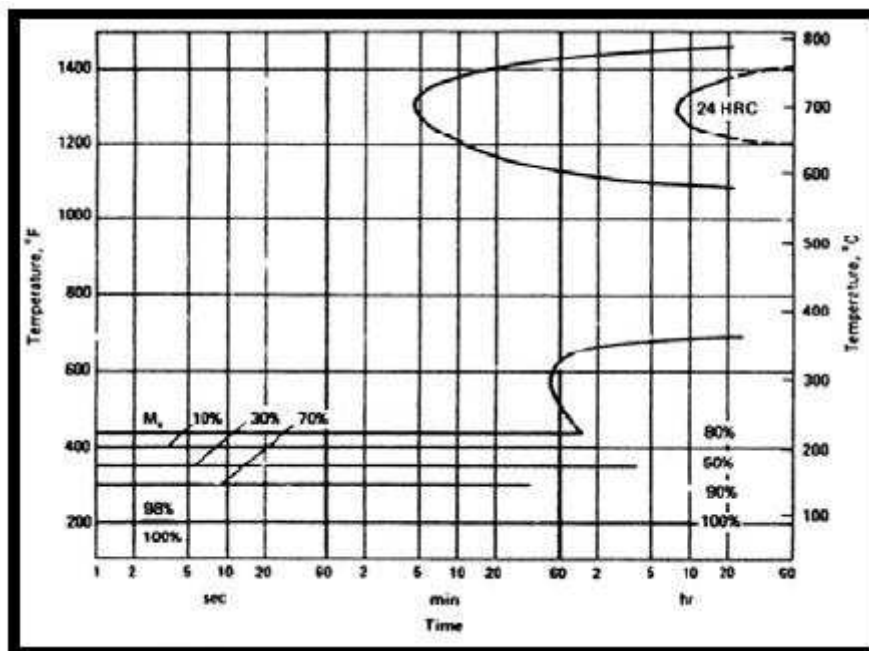


Fig. 1.4. Diagrama TTT (Tiempo, temperatura, transformación) del acero AISI D2. (1)

## D) OTRAS OPERACIONES DE EMBUTIDO

Existen piezas cuya geometría final requiere de más de un paso de embutido. Esta situación se encuentra limitada fundamentalmente por la relación límite de embutido que se analizará en el siguiente capítulo. Podemos citar dos variaciones al proceso típico de embutido, el reembutido y el planchado. El primero prácticamente no modifica el espesor de la pared previamente embutida. El segundo modifica el espesor de pared sin cambiar el diámetro interior logrando así piezas más alargadas.

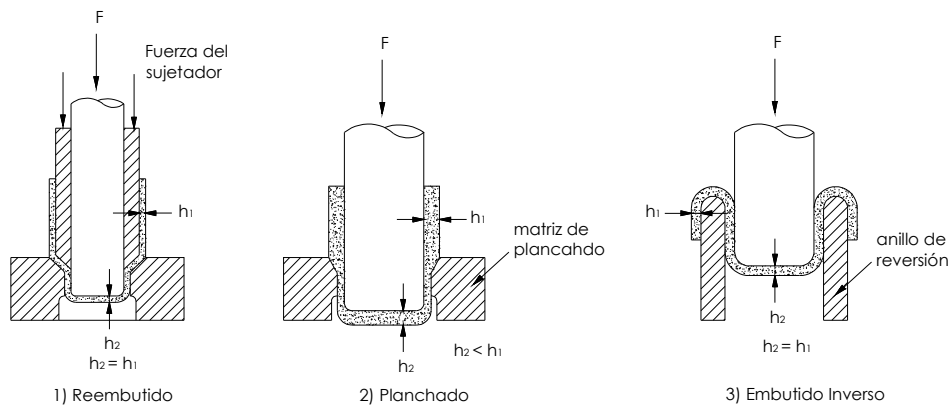


Fig. 1.5. Operaciones secundarias de embutido. 1) En el reembutido el espesor de la pared se mantiene constante, 2) en el planchado el espesor de pared se reduce a fin de conseguir piezas más alargadas, 3) en el embutido inverso la fuerza del punzón es menor debido a que la placa se dobla en el mismo sentido. (8)

Existe también un tercero, el embutido inverso, en el cual una placa metálica previamente embutida se coloca hacia abajo en el dado y una operación sucesiva de embutido la deforma nuevamente. Podría parecer una forma más compleja de llevar a cabo el proceso, sin embargo, para el metal resulta más fácil puesto que experimenta una menor deformación. Esto se explica debido a que las esquinas, tanto interiores como exteriores de la placa metálica, se doblan en la misma dirección del primer embutido, dando por resultado que el endurecimiento por deformación sea menor así como la fuerza que debe aplicar el punzón.

## E) VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO

Las bondades del proceso son extensas ya que permite el formado de placa metálica de manera rápida y con costos relativamente bajos. Las prensas y equipo necesario son de larga vida por lo que únicamente se requiere de una inversión inicial para echar a andar este proceso.

El embutido es una operación que tiene más variantes que otros procesos de trabajo en lámina metálica como el doblado o el cizallado, razón por la cual los defectos son mayores. Las desventajas o defectos del embutido más comunes son los siguientes: orejeado, desgarrado, arrugamiento de brida o pestaña, rayado superficial y arrugamiento en la pared.

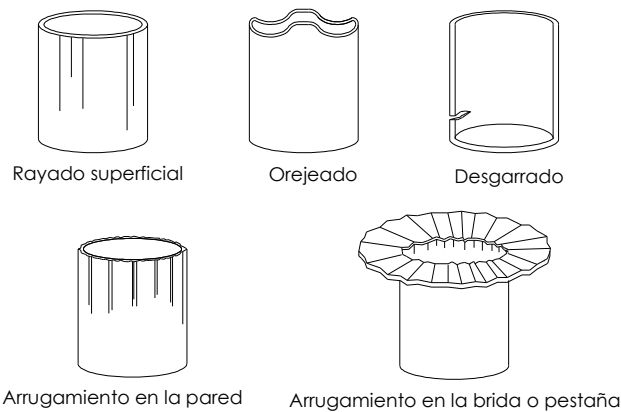


Fig. 1.6. Defectos clásicos en el embutido profundo. (8)

El orejeado es un defecto atribuible a la anisotropía del material. Las irregularidades que se forman en la parte superior de la pieza se pueden eliminar en el caso de tener un material isotrópico. En cuanto al desgarrado, éste normalmente se manifiesta como una grieta formada en las paredes de la pieza en las cercanías de la base embutida. El desgarrado es propio del adelgazamiento no controlado de la lámina debido a los efectos de la tensión y a defectos del punzón como pueden ser partes afiladas.

Los arrugamientos son propios de los efectos de la compresión en el material, se manifiestan como una serie de pliegues colocados radialmente en torno en la brida. Una correcta fuerza de sujeción entre el sujetador y el dado pueden reducir estos defectos en gran porcentaje así como el uso correcto de un lubricante.

Finalmente, el rayado en la pared es una consecuencia de una lubricación deficitaria, e incluso, también es atribuible a una alta rugosidad en el punzón y el dado.

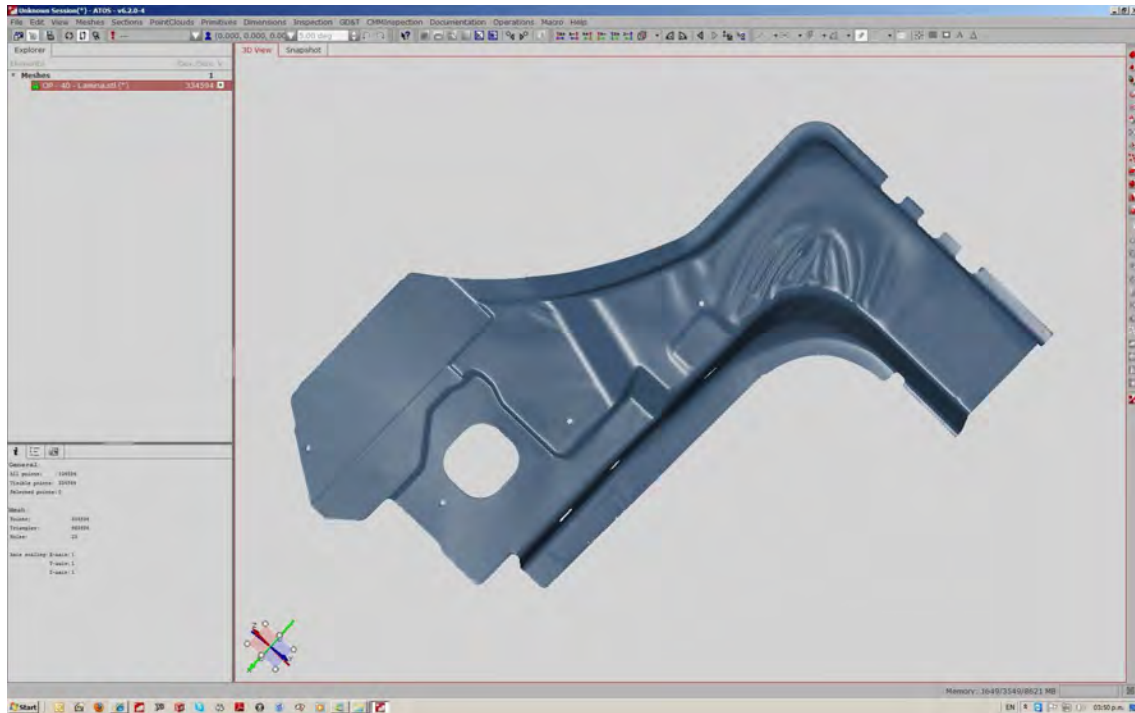


Fig. 1.7. Lámina de acero estampada de un poste de refuerzo en un vehículo Chrysler, nótese las arrugas asociadas a una mala sujeción. Imagen reproducida con autorización de Gestamp S.A.

## F) APLICACIONES INDUSTRIALES

El embutido se emplea extensamente en la manufactura de recipientes acopados, siendo ese el origen del proceso. Cabe señalar que realmente los procesos de estampado de lámina no son cien por ciento de embutido puro; lo más común es encontrar productos combinados del embutido y el estirado. Predominantemente la industria automotriz y la aeroespacial emplean productos de lámina de geometrías muy complejas y no solamente provenientes del embutido-estirado clásico, sino que utilizan las variantes como el estampado en caliente para obtener piezas de alta resistencia, por ejemplo, los postes para las puertas de los automóviles o las carcasas que alojan sistemas de transmisión de los automóviles (Figura 1.8). Ejemplos y aplicaciones de los procesos de deformación de lámina abundan, con las imágenes mostradas (Fig. 1.8, 1.9 y 1.10) se pretende dar un mayor panorama sobre la variedad y complejidad a la que puede llegar este proceso de conformado.



Fig. 1.8. Lámina estampada que aloja el sistema de la palanca de velocidades de un vehículo Nissan. Fotografiado con la autorización de Benteler de México S.A., 2010.

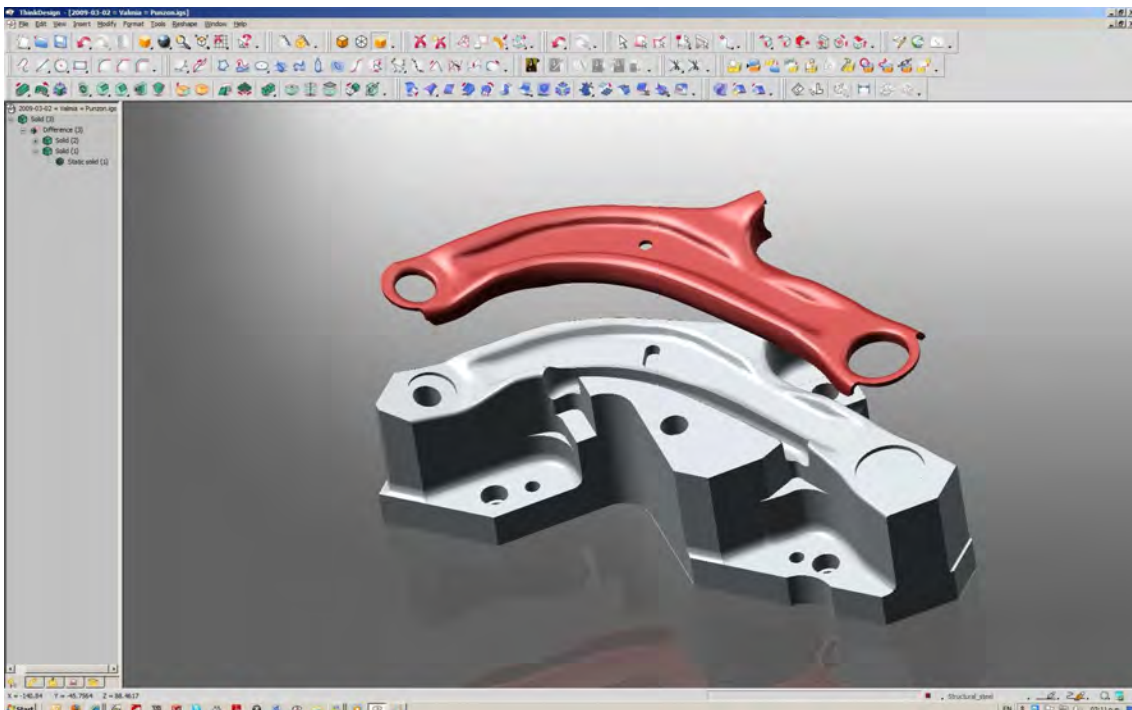


Fig. 1.9. Modelado en CAD (Think Design versión 2009) de un punzón de formado (parte gris) y la pieza activa sobrepuesta en rojo. Componente automotriz del vehículo 'Estaquitas'. Reproducido con autorización de Valmia SA. De CV. 2010.

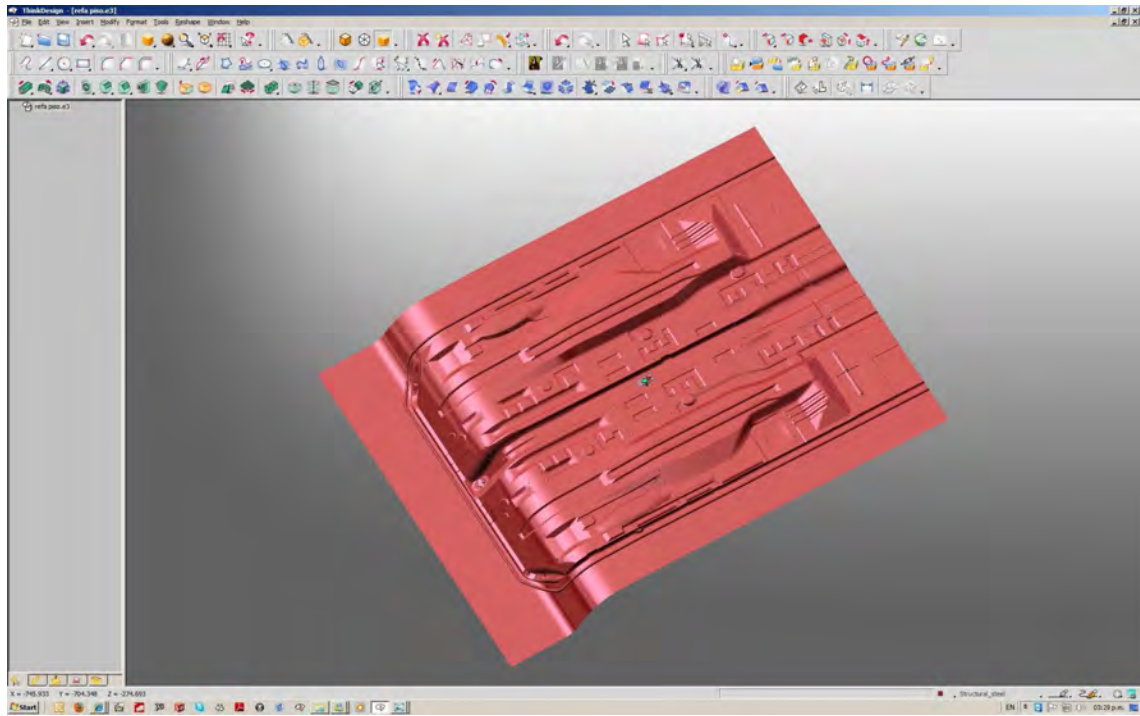


Fig. 1.10. Modelado en CAD (Think Design versión 2010) de los pisos de un vehículo Nissan. Reproducido con autorización de Benteler de México SA. 2010.

## Capítulo II Teoría de embutido profundo

### Objetivo:

Exponer las variables que intervienen en el proceso para establecer los modelos matemáticos necesarios para el cálculo de la fuerza del punzón y sujeción de la pieza, así como de otros parámetros importantes como la relación de embutido y anisotropía del material.

### A) VARIABLES

Como se mencionó en el capítulo anterior, existen limitantes en el proceso que permiten establecer la factibilidad del embutido profundo. La razón límite de embutido es una medida de la severidad del proceso y depende esencialmente de dos variables: el diámetro del disco a embutir y el diámetro del punzón. La relación límite de embutido (RLE) se define de la siguiente manera:

$$RLE = \frac{D_b}{D_p} \qquad RLE \cong 2.0 \qquad (2.1)$$

Donde:

$D_b$  = diámetro del disco a embutir.

$D_p$  = diámetro del punzón.

$RLE$  = relación límite de embutido

La fuerza total de embutido se compone de las fuerzas requeridas en la sujeción de la pieza y de la fuerza necesaria que aplica el punzón para vencer la fricción entre la lámina y el pisador y para vencer la fricción alrededor del radio de embutido; de lo anterior se desprende que la relación límite de embutido no es precisamente una constante del material, sino una propiedad del proceso.

Se considera que un límite superior a la RLE es aproximadamente de 2.0, entre mayor sea este valor más severa se considera que es la operación. Los valores que imponen las verdaderas limitaciones al proceso dependen de la geometría del punzón y del dado, específicamente de sus radios,  $R_p$  y  $R_d$ , de la fricción entre los elementos, de la



profundidad de embutido y de las características de la lámina que se esté trabajando tales como la anisotropía y ductilidad.

Aparte de la RLE, existen otras maneras de caracterizar el proceso de embutido, entre las que figura la reducción (Re), cuyo valor debe ser menor de 0.5 siendo congruentes con el 2.0 máximo permitido para la RLE.

$$Re = \frac{D_b - D_p}{D_b} \quad Re < 0.5 \quad (2.2)$$

Donde:  
Re = reducción.

Otro indicador de la embutibilidad se presenta con la relación de espesor al diámetro.

$$RED = \frac{h}{D_b} \quad RED > 1\% \quad (2.3)$$

Donde:  
h = espesor original de la lámina.  
RED = reducción de espesor al diámetro.

Este cociente se recomienda sea mayor en porcentaje al 1% debido a que se ha demostrado experimentalmente que una disminución en la RED aumenta la tendencia al arrugado. En situaciones en que los diseños de las piezas excedan las relaciones antes expuestas se deberá embutir en más de un paso, siendo posible que en algunas ocasiones se incluya un recocido entre los pasos.

## B) FUERZAS DE EMBUTIDO

Las fuerzas que intervienen en el proceso son fundamentalmente dos, la fuerza del punzón y la fuerza de sujeción.

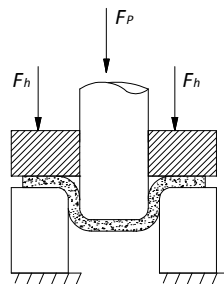


Fig. 2.1. Fuerzas básicas involucradas en el embutido típico de forma acopada. En donde  $F_p$  es la fuerza del punzón y  $F_h$  es la fuerza del pisador o dado de sujeción, (8)

La fuerza total de embutido puede expresarse como:

$$F_T [N] = F_p + F_h \quad (2.4)$$

Donde:

$F_T$  = fuerza total.

$F_p$  = fuerza del punzón.

$F_h$  = fuerza de sujeción.

La fuerza que requiere el punzón para producir la copa es la suma de la fuerza ideal de deformación, fuerzas de fricción y la fuerza necesaria para producir un planchado si es que éste se encuentra presente en la misma operación. La figura 2.2 ilustra la manera en que los componentes de la fuerza total del punzón varían con el movimiento del mismo.

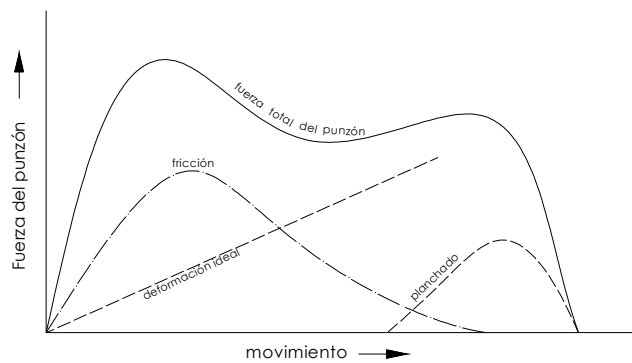


Fig. 2.2. Fuerza del punzón versus movimiento del punzón en embutido profundo. (6)

Una medida del trabajo requerido en el embutido de una copa muestra que el 70% del trabajo se realiza en el embutido radial de la pieza, 13% se consume en superar la fricción y el 17% restante se aplica en el doblado y desdoblado de la lámina en el dado.

Haciendo un análisis de las fuerzas en equilibrio durante el embutido profundo de una forma acopada, se tiene la siguiente ecuación aproximada para la fuerza total del punzón, que depende del diámetro del disco a embutir  $D_b$  para cualquier instante en el proceso.

$$F_p = \left[ \pi D_p h (1.1 \sigma_0) \ln \frac{D_b}{D_p} + \mu \left( 2 F_h \frac{D_p}{D_0} \right) \right] e^{\left( \frac{\mu \pi}{2} \right)} + B \quad (2.5)$$

Donde:

$F_p$  = fuerza del punzón.

$D_p$  = diámetro del punzón.

$\sigma_0$  = promedio del flujo de esfuerzos.

$D_b$  = diámetro del disco a embutir.

$F_h$  = fuerza de sujeción.

$h$  = espesor de la pared de la copa.

$B$  = fuerza para doblar y desdoblar el disco a embutir.

$\mu$  = coeficiente de fricción.

En la ecuación 2.5 el primer término dentro del corchete constituye la fuerza ideal necesaria para embutir la copa, el segundo término es la fuerza de fricción bajo el dado de sujeción. El término exponencial considera la fricción en el radio del dado. Finalmente, B, hace referencia a la fuerza requerida para doblar y desdoblar la lámina en torno al radio del dado.

Una ecuación bastante empleada y que la literatura (8) marca como muy aproximada a la fuerza del punzón de embutido:

$$F_p = \pi D_p h (TS) \left( \frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right) \quad (2.6)$$

Donde:

$TS$  = esfuerzo de tensión.

$F_p$  = fuerza del pistón.

El término de 0.7 se considera un factor de ajuste por fricción, su origen se basa en que la relación límite de embutido puede aproximarse de la siguiente manera:

$$RLE = \left( \frac{D_b}{D_p} \right)_{\max} = e^{\eta} \quad (2.7)$$

donde  $\eta$  es un término de eficiencia asociado a las pérdidas por fricción. Si  $e^{\eta} = 1$ , entonces la relación de embutido es 2.7, mientras que si establecemos el límite de la RLE en el valor de 2.0,  $\eta = 0.7$ . Esto de acuerdo a la experiencia que demuestra que,

incluso con metales dúctiles, es complicado obtener formas acopadas en donde la altura es mucho mayor que su diámetro.

La fuerza de sujeción también tiene asignada una ecuación que permite aproximar su valor a una cantidad necesaria para que la operación de embutido se lleve a cabo con éxito evitando errores en las piezas finales cuyo origen se debe a un ajuste deficiente en dicha fuerza, tales defectos se manifiestan en forma de pliegues o arrugamientos, desgarres etc. La fuerza de sujeción se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_h = 0.015Y\pi \left[ D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2 \right] \quad (2.8)$$

Donde:

$Y$  = Esfuerzo de fluencia.

La fuerza de sujeción es alrededor de una tercera parte de la fuerza de embutido  $F_h = (1/3)F_p$ .

### C) CAPACIDAD DE EMBUTIDO

Sugerir que la relación límite de embutido tenga un límite superior de 2.0 es un indicativo de la capacidad del proceso marcada tanto por el diámetro del punzón como del diámetro del disco a embutir, tratándose, claro está, de un proceso en el que se fabrique una forma acopada. Sin embargo, en el embutido profundo, la capacidad también tiene como variante a la anisotropía de la lámina con la que se trabaje.

La deformación real en un material está determinada por el logaritmo natural de la nueva dimensión dividido entre la dimensión original.

$$r = \ln \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.9)$$

Donde:

$\varepsilon_w$  = ancho de deformación.

$\varepsilon_t$  = espesor de deformación.

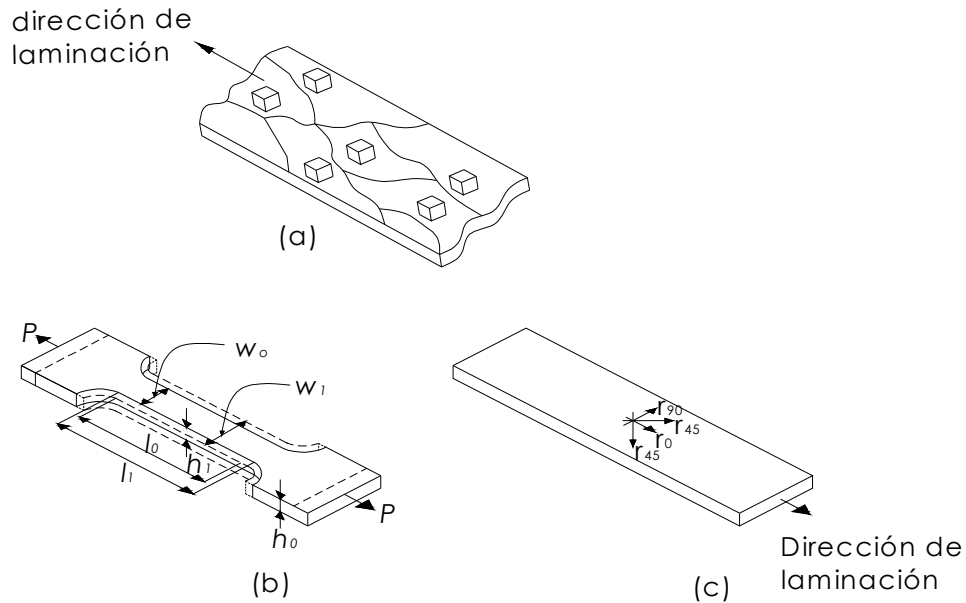


Fig. 2.3. a) Desarrollo de una textura. b) Efectos de la anisotropía en la deformación de un material sometido a ensayo de tensión c), los cuales se repiten en direcciones diferentes (10).

De acuerdo a la figura 2.3. Podemos establecer las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_l + \varepsilon_t + \varepsilon_w = 0 \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_w = \ln \frac{w_1}{w_0} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_t = \ln \frac{h_1}{h_0} \quad (2.12)$$

Donde:

$\varepsilon_l$  = longitud de deformación.       $w_1$  = ancho inicial       $h_0$  = ancho final  
 $\varepsilon_w$  = ancho de deformación.       $w_0$  = ancho final.  
 $\varepsilon_t$  = espesor de deformación.       $h_1$  = espesor inicial

De lo cual se desprende la ecuación 2.9,  $r = \ln \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t}$ . Un valor elevado en r denota alta

resistencia al adelgazamiento en la dirección del espesor.

La lámina metálica demuestra variaciones en sus propiedades al momento de conformarse, no se obtiene la misma respuesta del material al trabajarlo en dirección de la laminación que en un sentido perpendicular a ella. Esto se debe a la anisotropía planar (en dirección de la laminación) y normal (perpendicular a la superficie de la

lámina). Para separar estas dos anisotropías se ha definido un valor medio a cada una de ellas, para la normal ésta queda representada por la siguiente ecuación:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (2.13)$$

Para la anisotropía planar

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2.14)$$

La correlación entre el valor de  $\bar{r}$  y la relación límite de embutido está dada por la siguiente imagen de acuerdo también a la estructura cristalina de los metales.

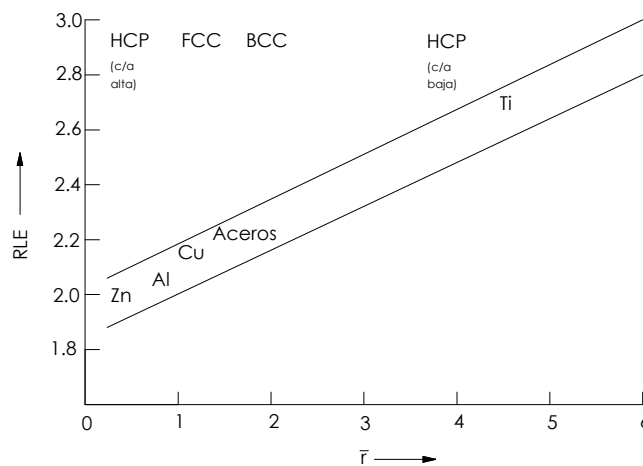


Fig. 2.4. La anisotropía normal alta incrementa la relación límite de embutido. (10)

Un material con anisotropía planar ocasiona frecuentemente el orejeador en las piezas embutidas como reflejo de la simetría de los cristales de la lámina, por ello, la brida se engrosa menos en dirección del mayor valor de  $r$ , razón por la cual se forman las orejas en esas direcciones.

La mejor manera de entender el papel que juega la anisotropía en el embutido es mediante un diagrama que relaciona el estado de esfuerzos en la zona en que falla la pared de la copa y en la brida.

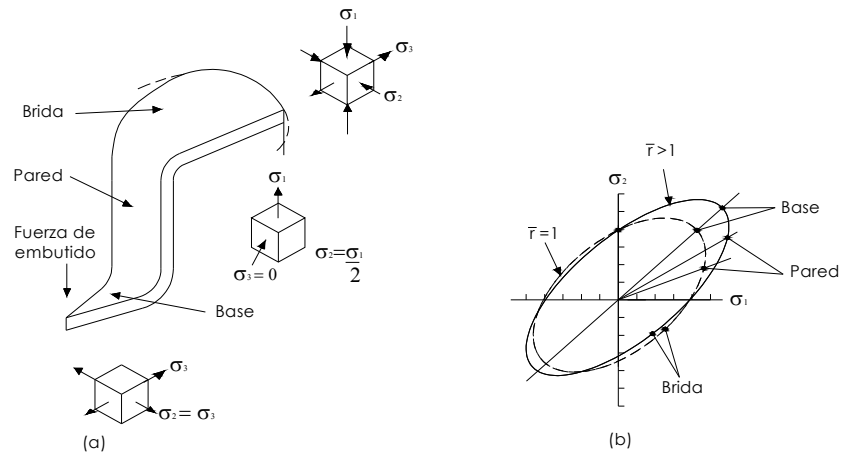


Fig. 2.5. (a) Estado de esfuerzos asociado a la deformación de la copa en una sección en forma de 'rebanada de pastel'. (b) Un material con mayor anisotropía,  $r$ , aumenta resistencia con el reforzamiento de la base y de la pared. (10)

La figura anterior demuestra que la pared de la copa se ve fortalecida mediante un control de la textura  $\bar{r} > 1$ , aumentando así la capacidad de embutido.

#### D) CONSIDERACIONES ADICIONALES AL PROCESO DE EMBUTIDO Y EN GENERAL AL ESTAMPADO DE LÁMINA

Hasta el momento se ha descrito el proceso de embutido de una manera teórica, en la cual se supone que la lámina fluye dentro de una matriz de formado empujada por un punzón conservando siempre el mismo espesor. La práctica nos dice que esto, a pesar de ser lo deseable, no se cumple cabalmente, de hecho, como se mencionó en el capítulo I, las operaciones en lámina metálica son realmente una combinación de embutido, doblado y estirado, en la figura 2.6 tenemos una lámina de geometría compleja la cual se obtiene a partir de placa de acero de 1.2 mm de espesor, se emplea para producir la carcasa que aloja a la palanca de velocidades de un vehículo Nissan. La complejidad de la pieza sugiere esfuerzos y deformaciones muy severas en el conformado de la lámina, por ello, los errores típicos del proceso se hacen patentes, sobre todo el arrugado.



Fig. 2.6. Lámina estampada que aloja el sistema de la palanca de velocidades de un vehículo Nissan. Fotografiado con la autorización por Benteler de México S.A.

Asimismo, el espesor de la lámina no permanece constante presentando adelgazamientos y engrosamientos en algunas zonas. Con un software de inspección, para este caso, ATOS, es posible determinar las variaciones del espesor (Fig. 2.7)

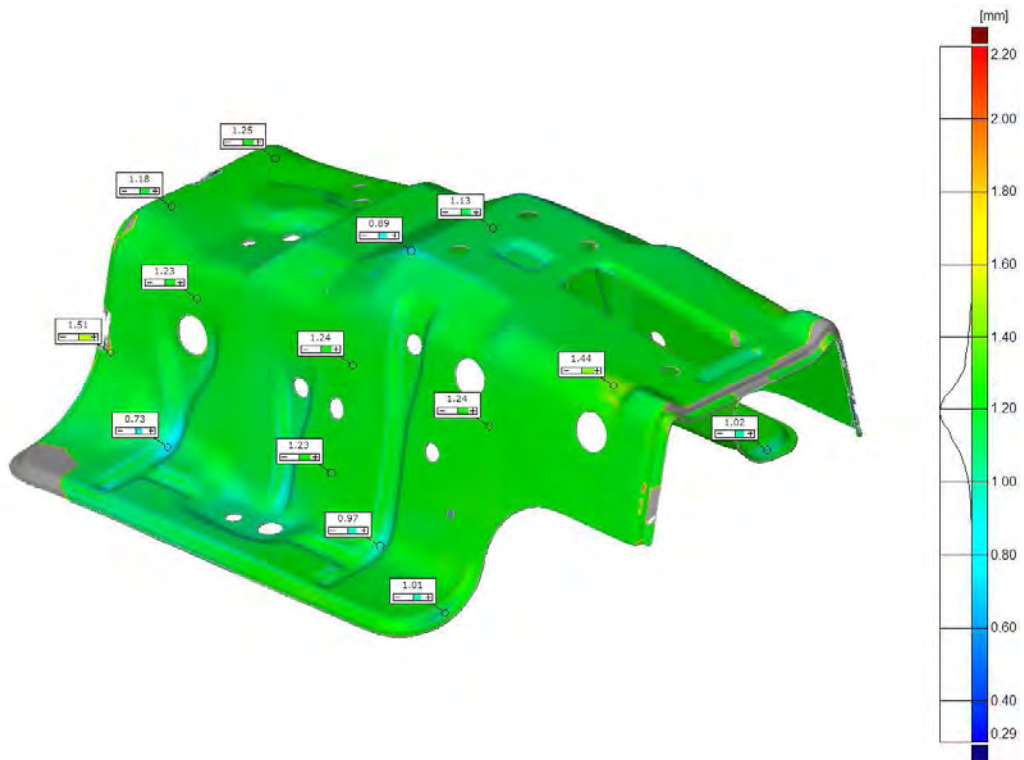


Fig. 2.7. Análisis de espesores en una pieza digitalizada posterior al conformado de la misma. Imagen reproducida con permiso de Benteler de México S.A.



En la figura 2.7 se aprecia un análisis en puntos específicos que permiten conocer el comportamiento real de la lámina como resultado del estampado. Nótese que existen zonas en las que la lámina tiende a engrosarse y otras que se adelgazan. El adelgazamiento se da primordialmente en áreas de doblado llegando a valores muy pequeños (0.79, 0.83 mm) aunque en general la lámina tiende mayoritariamente a permanecer en un rango de 1.2 +/- 0.15 mm.

### Capítulo III Rediseño y construcción

#### Objetivo:

Dar a conocer las condiciones iniciales del herramental; explicar y justificar los cambios que se realizaron en la geometría original haciendo especial énfasis en la manufactura de un par de dados que permitieron adaptar el dispositivo a los fines que establece la norma ASTM E643 (2) para la caracterización de lámina metálica. También se habla sobre el tratamiento térmico que se empleó en el endurecimiento del herramental.

#### A) CONDICIONES INICIALES

El laboratorio de pruebas mecánicas de la facultad cuenta con un herramental que alguna vez se empleó para hacer ensayos de embutido. Las partes de dicho herramental al ser examinadas tienen la virtud de poder adaptarse a los lineamientos que la norma ASTM E643 establece para poder realizar pruebas de caracterización de lámina metálica a través del conocido ensayo Erichsen. La geometría que la norma recomienda en el herramental es la siguiente.

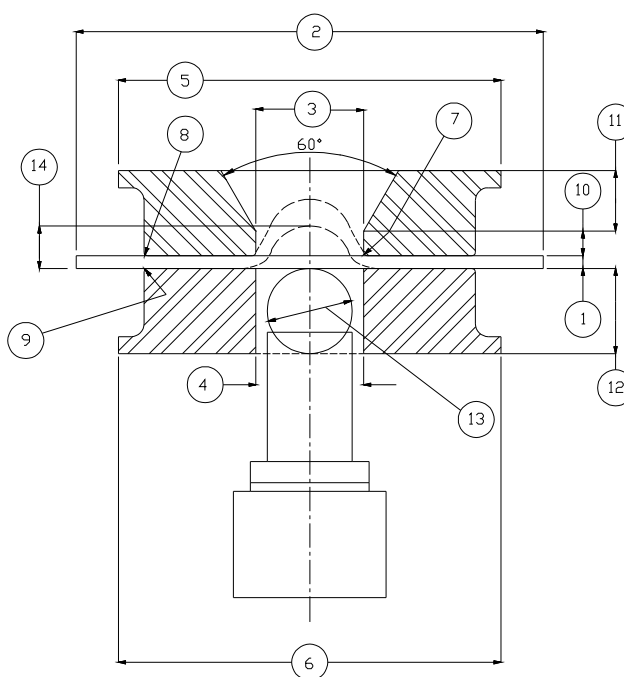


Fig. 3.1. Herramental de prueba normalizado para ensayo Erichsen (2).

Número	Dimensiones
1.- Espesor de la muestra	Espesor completo
2.- Ancho de la muestra (mínimo)	90
3.- Barreno central del dado superior	25.4
4.- Barreno central del dado inferior	25.4 +/- 0.1
5.- Diámetro externo del dado superior	90
6.- Diámetro externo del dado inferior	90
7.- Redondeos internos del dado superior	0.81 +/- 0.05
8.- Redondeos externos del dado superior	0.8
9.- Redondeos externos del dado inferior	0.8
10.- Profundidad en zona recta del dado superior	5 +/- 0.2
11.- Espesor del dado superior (mínimo)	20
12.- Espesor del dado inferior (mínimo)	20
13.- Diámetro de la cabeza del punzón	20 +/- 0.04
14.- Profundidad de copa	Profundidad de copa

Tabla 3.1. Dimensiones del herramental normalizado para pruebas de ensayo Erichsen. Todas las unidades en milímetros (2).

Se modeló en CAD el herramental original para tener una base virtual y hacer las modificaciones correspondientes.

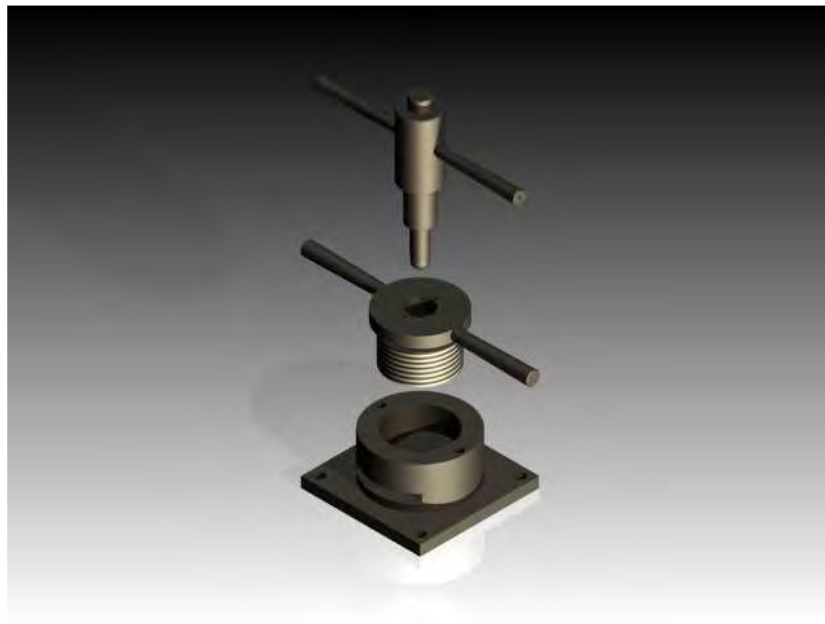
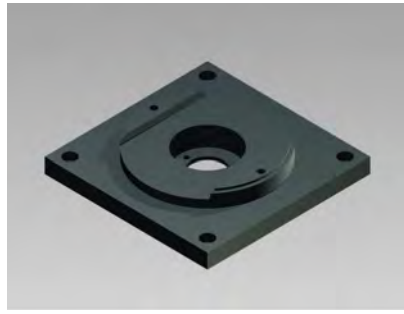


Fig. 3.2 Modelo del herramental original.

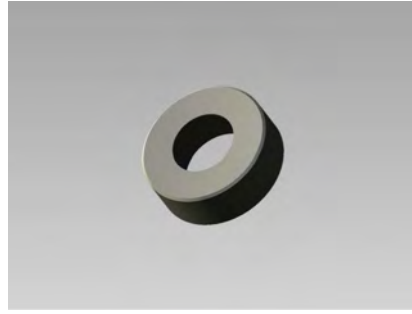
El herramental previo a la modificación consta de las siguientes piezas:

1. Base de sujeción
2. Pisador en base de sujeción
3. Pisador en dado superior de apriete
4. Dado roscado
5. Centrador
6. Anillo roscado
7. Alojamiento para punzón
8. Punzón
9. Palancas para ajuste de punzón
10. Palancas para ajuste de dado roscado
11. Un par de tornillos de sujeción tipo Allen de 3/16'' x 2''
12. Un par de tornillos de sujeción tipo Allen de 3/16'' x 1/2''

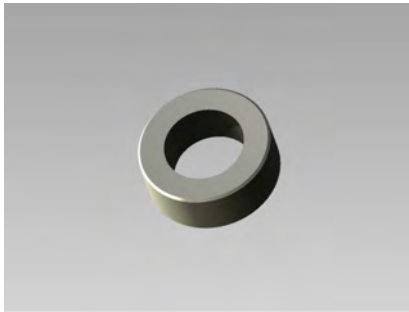
En la siguiente figura se aprecian las piezas por separado que componen el  
herramental original.



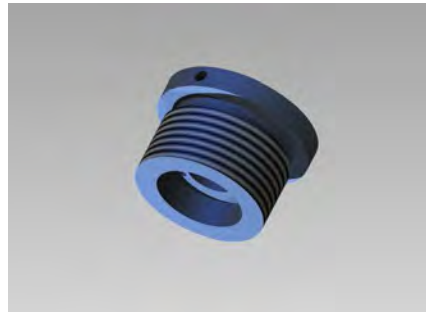
1



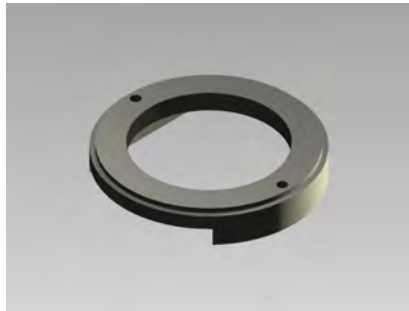
2



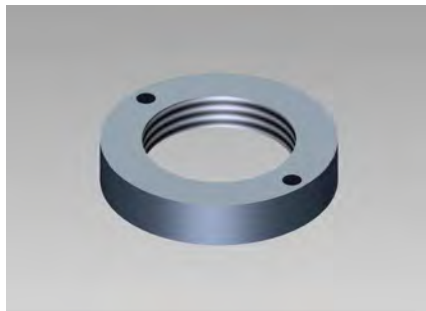
3



4



5



6



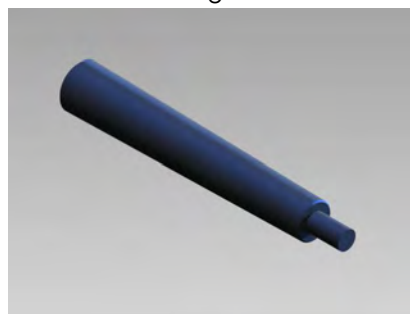
7



8



9



10



Fig. 3.3 Partes del herramental previo al rediseño. 1) Base de sujeción, 2) Pisador en base de sujeción, 3) Pisador en dado superior de apriete, 4) Dado roscado, 5) Centrador, 6) Anillo roscado, 7) Alojamiento para punzón, 8) Punzón. 9) Palanca para ajuste de punzón, 10) Palanca para ajuste de dado roscado, 11) Tornillo allen de 3/16 por 1/2", 12) Tornillo allen de 3/16 por y 2".

Como se puede intuir, no todo el herramental requiere de alguna modificación severa, básicamente lo que se necesita es fabricar los dados superior e inferior a semejanza de lo que se presenta en la figura 3.1 y adaptar las piezas del herramental original para que puedan alojar a dichos dados, en algunas partes lo que se busca es rectificar las superficies o prepararlas para realizar algún tipo de ajuste o apriete entre ellas.

En lo que respecta al anillo roscado, el que corresponde al número 6 de la figura 3.3, éste posee un cajeadado circular en la parte inferior cuya profundidad original es de 3 mm. La modificación que se plantea incluye hacer más profunda esa caja, dándole otros 3 mm más (Fig. 3.4.); ésto para que al momento de colocar una muestra el anillo de posición no ‘muerda’ a la lámina, sino que la lámina únicamente quede sujeta por la presión ejercida por los dados.

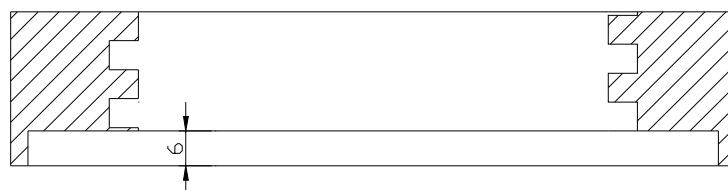


Fig. 3.4. Esquema que muestra la altura total de la caja que se desea maquinar en el anillo roscado

En el caso de la base de sujeción, el pisador original que se encuentra ensamblado en el barreno central deberá ser removido para que dicha base de sujeción sirva para dar soporte al dado con la abertura de 60°. Podría suponerse que colocar el dado superior en la base (parte inferior del dispositivo) constituiría una falta a la

configuración que establece ASTM, sin embargo el movimiento de las piezas puede ser visto como movimiento relativo con lo cual el dispositivo sigue satisfaciendo las especificaciones de la norma.

Para que la base de sujeción aloje de manera satisfactoria al dado es necesario rebajar en la parte baja de la base 2 mm más, esto para que el dado sobresalga 2 mm respecto de la paralela del centrador. Esos dos milímetros junto con el maquinado en el anillo roscado permiten que las muestras de lámina queden sujetas única y exclusivamente por los dados.

Un ensamble que ilustra la configuración que se obtendrá al hacer los cambios en la base de sujeción junto con el maquinado del dado normalizado se aprecia en la siguiente imagen.

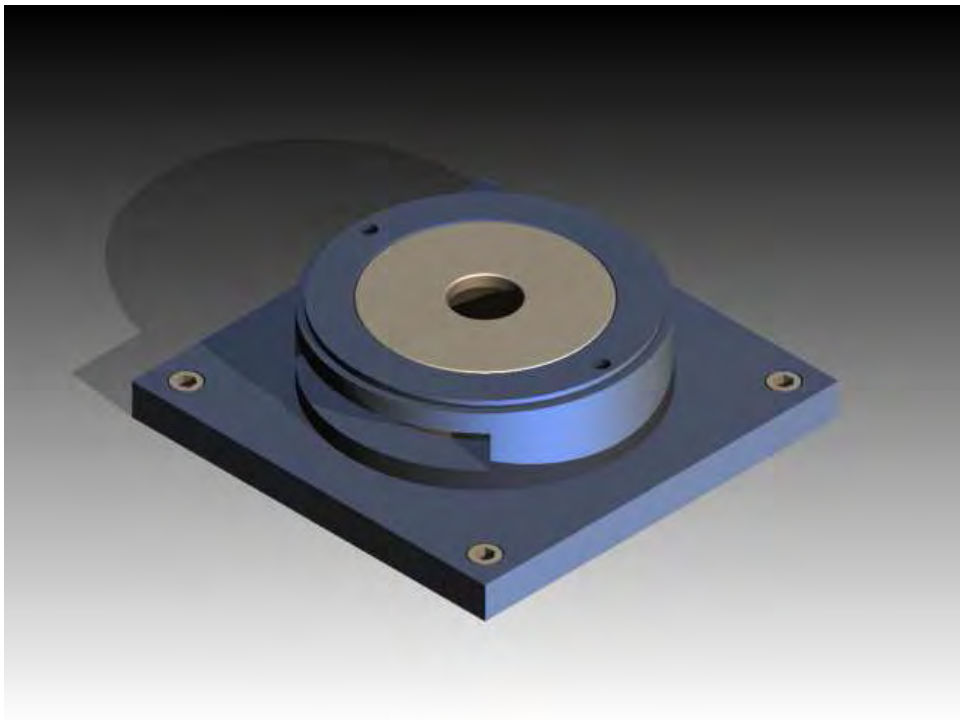


Fig. 3.5. Ensamble de la base de sujeción, centrador y el dado con ángulo de salida de 60°.

En lo que toca al punzón, cabe decir que tal como se encuentra originalmente sirve para llevar a cabo el ensayo Erichsen. La cabeza del punzón debe tener un diámetro

de 20 mm, mismos con que cuenta el punzón del laboratorio, bastará sólo con dar el pulido necesario para cumplir con la restricción de rugosidad, asimismo, se verificará su dureza para estar dentro de la norma (mínimo 62 HRC).

En lo que respecta a la parte del herramienta que alojará al segundo dado, se tiene previsto únicamente rectificar la cavidad hasta un diámetro que permita obtener un ajuste de apriete entre la pieza y el dado.

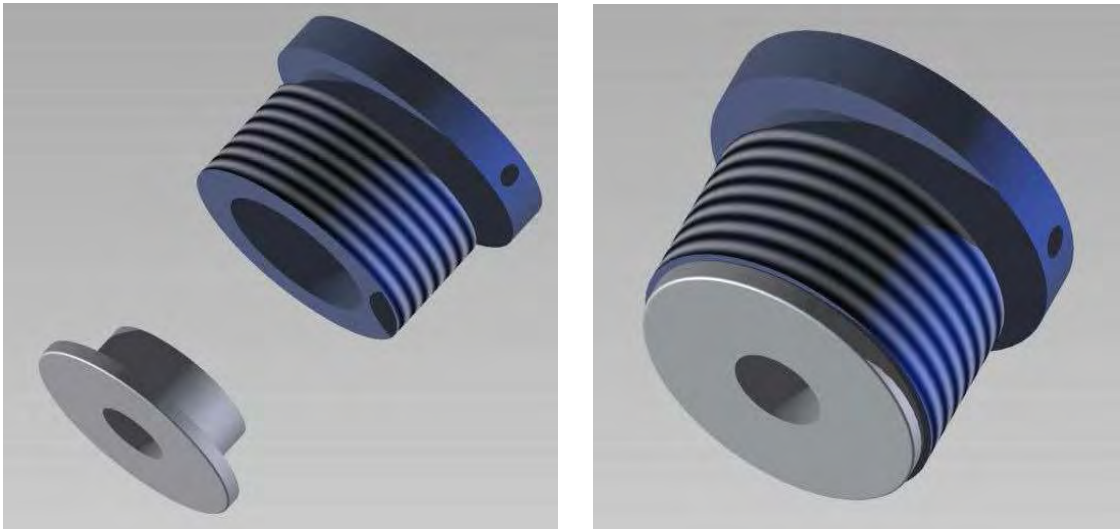


Fig. 3.6. Ensamble entre el dado roscado y el dado normalizado

Una imagen general que nos ilustra el cómo se espera que ensamble el herramienta rediseñado es la siguiente.

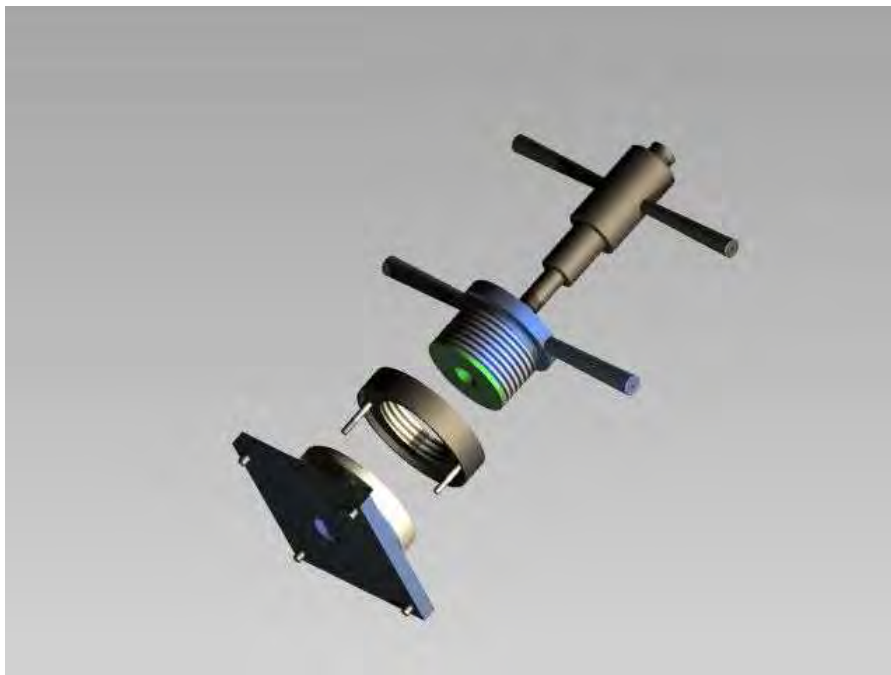


Fig. 3.7. Vista general del herramienta para ensayo Erichsen.

## B) MANUFACTURA Y MATERIALES EMPLEADOS

Las partes nuevas del herramental constan de un par de dados (figura 3.8) que permiten realizar la sujeción de la lámina para el posterior estirado de la misma. Dichos dados fueron construidos a partir del acero para herramientas D2 ya que es la aleación recomendada para trabajo en frío y de estampado, la literatura (1) lo marca como un acero con buen desempeño contra el desgaste.

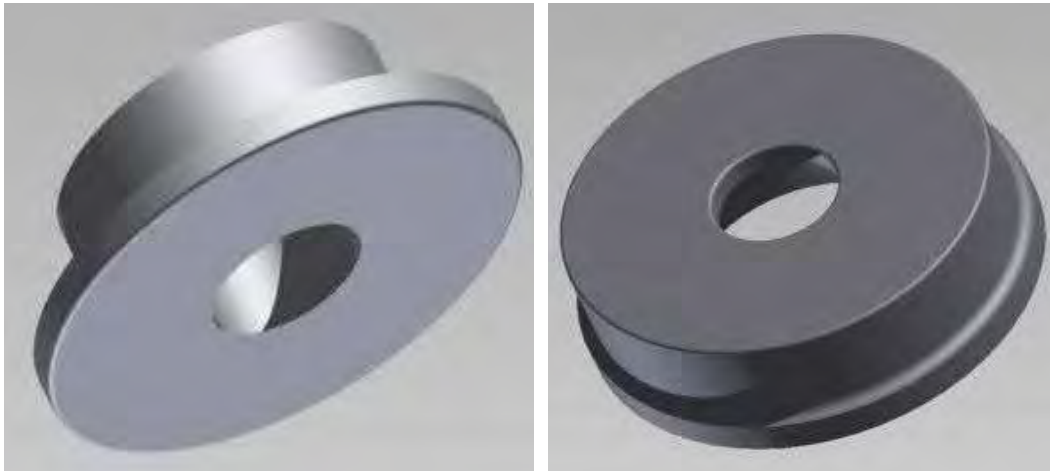


Fig. 3.8. Dados diseñados para el herramental

Los siguientes datos fueron obtenidos del fabricante del acero D2 con el que se hizo el maquinado de las piezas y dan un panorama general del tipo de material con el que se trabajaron los dados.

<b>PALMEXICO</b>	D-2
AISI, ASTM, NMX.	D-2
UNS	T30402

Análisis químico según Norma Nacional NMX B-82 (% en peso):

<b>C</b>	<b>Si máx.</b>	<b>Mn máx.</b>	<b>P máx.</b>	<b>S máx.</b>	<b>Cr</b>	<b>V máx.</b>	<b>Mo</b>
1.40-1.60	0.10-0.60	0.20-0.60	0.030	0.030	11.00-13.00	0.50-1.10	0.70-1.20

Otros residuales, valor máximo:

Cu = 0.25% Ni = 0.30% Cu + Ni = 0.40% As + Sn + Sb = 0.040%

**Tipo:** Acero para trabajo en frío, tipo alto-carbono alto-cromo.

**Formas y Acabados:** Redondo, cuadrado y solera; disco y anillo forjado; barra perforada.

**Características:** Este acero presenta alta resistencia al desgaste, así como tenacidad moderada. Maquinabilidad y afilado también



moderados.

**Aplicaciones:**

Se emplea para fabricar matrices cortantes, punzones, cuchillas, **matrices para estampado** y acuñado; rodillos laminadores y roscadores, entre otros.

**Observaciones:**

Proteger contra descarburización usando atmósfera controlada o cubriendo el acero con material inerte, al calentar para recocer o templar. Dureza después de recocido: 190-240 HB. Eliminar toda la capa descarburada de laminación o forja antes de templar. Revenir inmediatamente. Cuando la herramienta se va a someter a impactos, conviene hacer un segundo revenido a 500 °C. Para obtener buenos resultados es esencial igualar la temperatura en toda la pieza.

D2



Identificación en color blanco y rojo. Acero indeformable, alto contenido de cromo herramienta para madera, de corte **y de estampado**.

<b>Temperatura</b>	20 °C	200 °C	400 °C
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7 700	7 650	7 600
<b>Conductividad térmica (W/m °C)</b>	20.0	21.0	23.0
<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>	210 000	200 000	180 000
<b>Calor específico (J/kg°C)</b>	460	-	-

<b>Dureza (HRC)</b>	<b>Límite elástico de compresión (MPa)</b>
62	2 200
60	2 150
55	1 900
50	1 650

Tabla 3.2. Propiedades típicas del acero AISI D2 según el fabricante.

El maquinado de los dados se efectuó mediante procedimientos convencionales de torneado. Las partes con tolerancias bajas, tales como los radios de 0.8 y 0.81 con sus respectivas tolerancias, se manufacturaron a partir de plantillas hechas a la medida. Una vez maquinados los dados se procedió a dar el pulido a espejo en las caras de interés ésto con la finalidad garantizar que las superficies no excedieran la rugosidad límite especificada de 0.004 mm.



Fig. 3.9. Aspecto de los dados y el punzón pulidos a espejo

Por disposición de la norma se debe cumplir con una dureza mínima en las áreas de contacto de los dados con las muestras, la cual es de 56 HRC y en la cabeza del punzón de 62 HRC. En una prueba de dureza a los dados recién maquinados se obtuvo 22.3 HRC, insuficientes para cumplir con la especificación de ASTM. A fin de no deformar las superficies de las piezas y obtener una dureza dentro del rango se decidió endurecer a los dados y al punzón mediante el tratamiento de nitruración.

En las superficies de los dados que estarán en contacto con la lámina del ensayo, el trabajo de nitruración se solicitó a una profundidad de 0.635 mm (0.025 in), en el resto del dado la penetración fue de 0.381 mm (0.015 in). La nitruración para el punzón fue igualmente de 0.635 mm en la cabeza y en el resto de su geometría fue de 0.381 mm. Como se aprecia en las siguientes imágenes, el nitrurado de las partes no afectó en nada a la geometría de las piezas, éstas únicamente adquirieron una tonalidad guinda tornasol, sin embargo tanto los acabados como la rugosidad se aprecian intactos.



Fig. 3.10. Dados y punzón posteriores a la nitruración.

En el Metals Handbook (1) se establece que posterior a un tratamiento de endurecimiento por nitruración el acero D2 rondará en una dureza de entre 58 y 64 HRC. La empresa en donde se trataron las piezas garantiza para los dados una dureza mínima de 57 HRC. En el caso del punzón se desconoce el acero con el se manufacturó originalmente, por ello, en el servicio de tratamiento térmico se solicitó la medición de dureza alcanzada por esta pieza posterior al tratamiento, resultando ser de 67 HRC, 5 unidades por encima de los 62 puntos requeridos.

Cabe mencionar que la rugosidad de los dados y del punzón fue cuantificada toda vez que se le devolvió el acabado a espejo a las piezas nitruradas. Para los dados la rugosidad promedio obtenida fue de 0.002 mm y para el punzón de 0.003, valores que satisfacen las necesidades del estándar adoptado.

Las piezas del herramental que únicamente requirieron de un rectificado o de cortes milimétricos, tales como la base de sujeción, el anillo roscado, el centrador y el punzón se muestran ya remaquinados en la siguiente imagen.

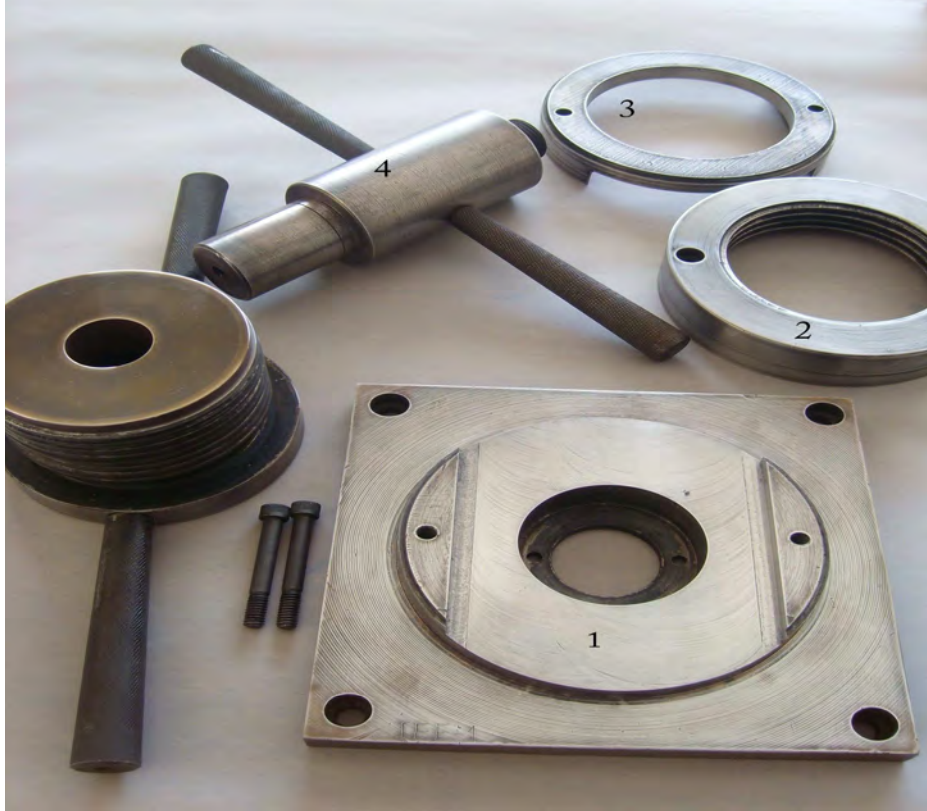


Fig. 3.11. Partes remanufacturadas del herramental: 1) Base de sujeción, 2) Anillo roscado, 3) Centrador y 4) Alojamiento para punzón

### C) PLANOS DEL HERRAMENTAL

A continuación se presentan uno a uno los planos de las partes que constituyen el herramental normalizado para ensayo Erichsen.

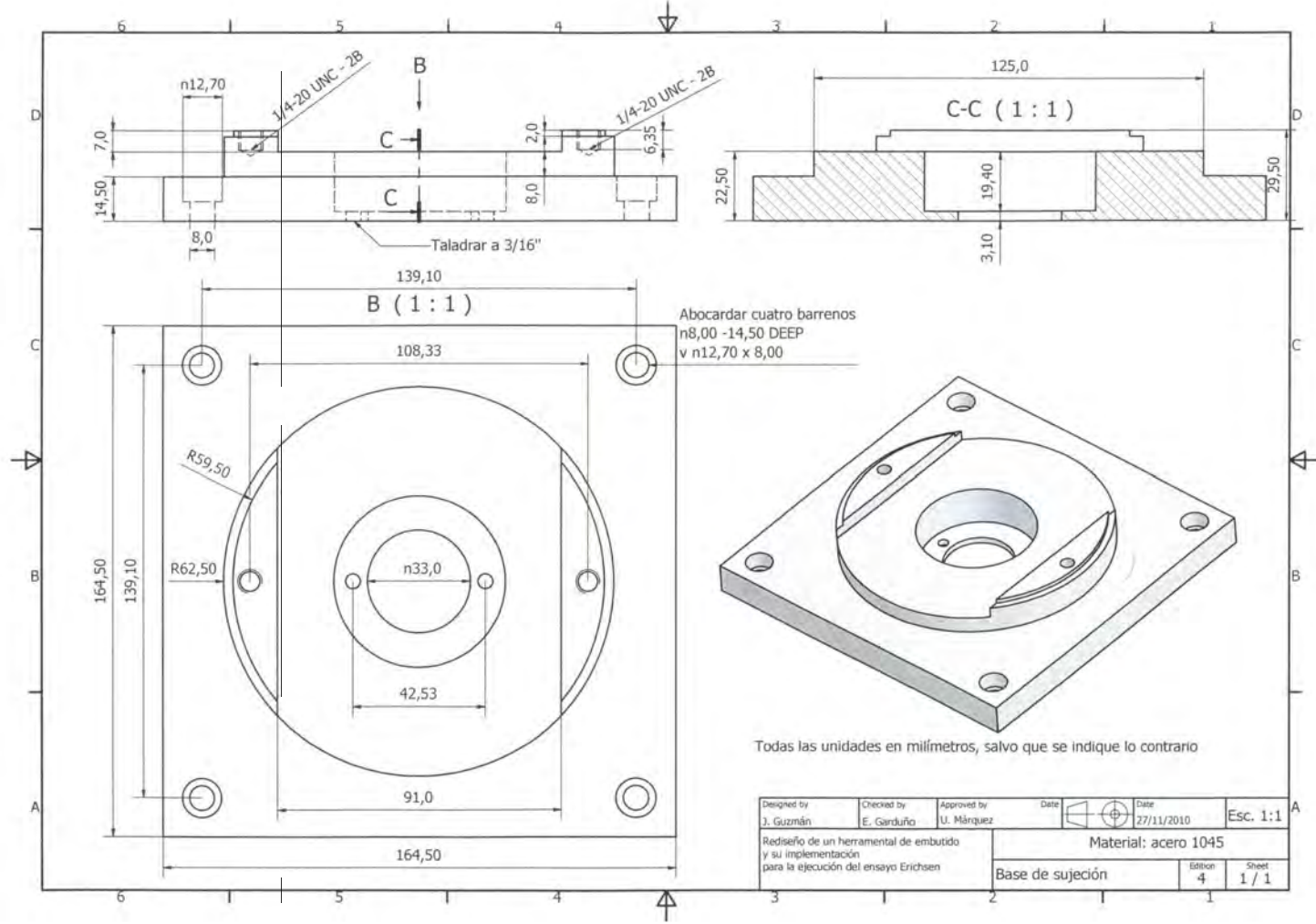


Fig. 3.12. Plano. base de sujeción.

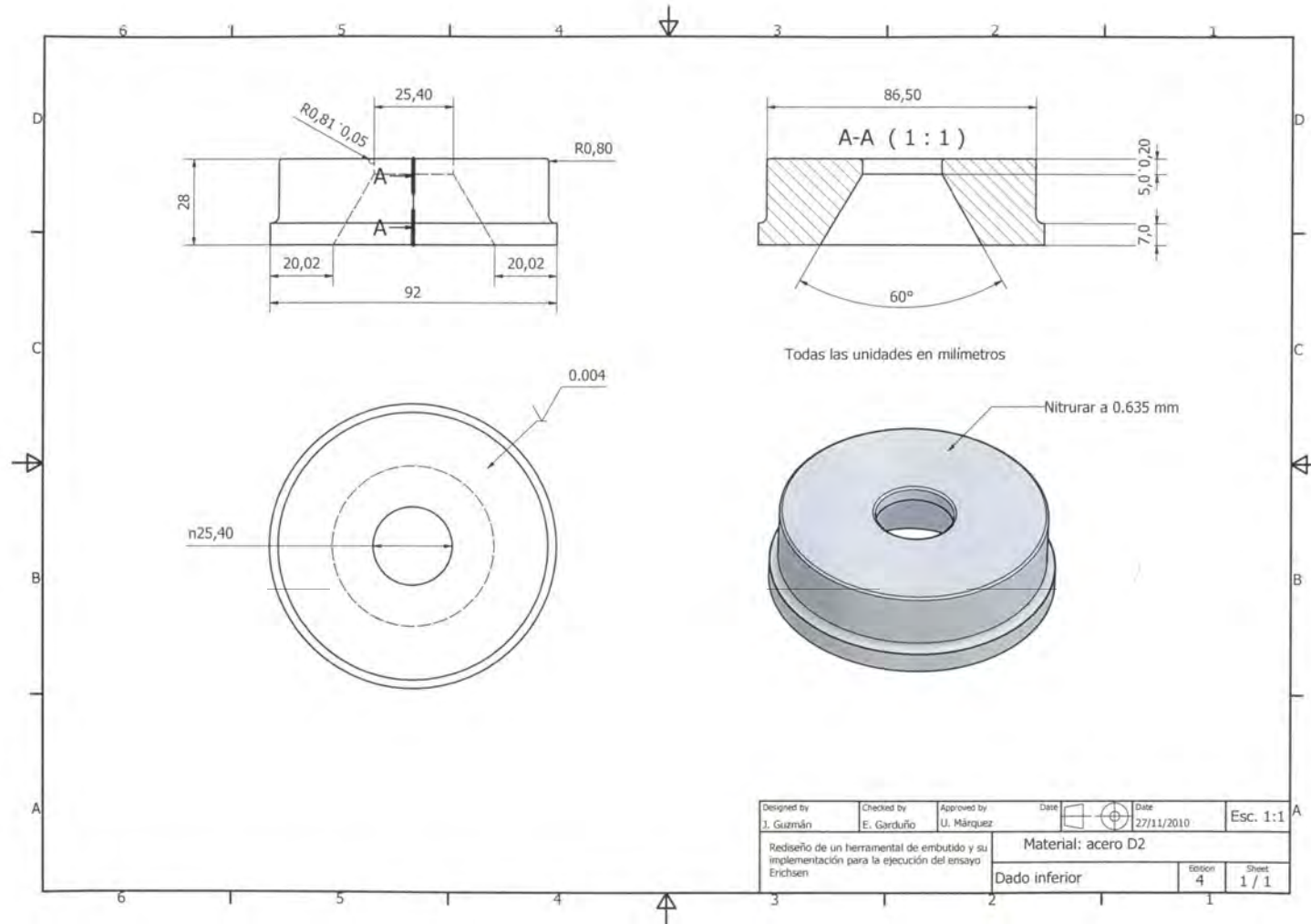


Fig. 3.13. Plano, dado inferior.

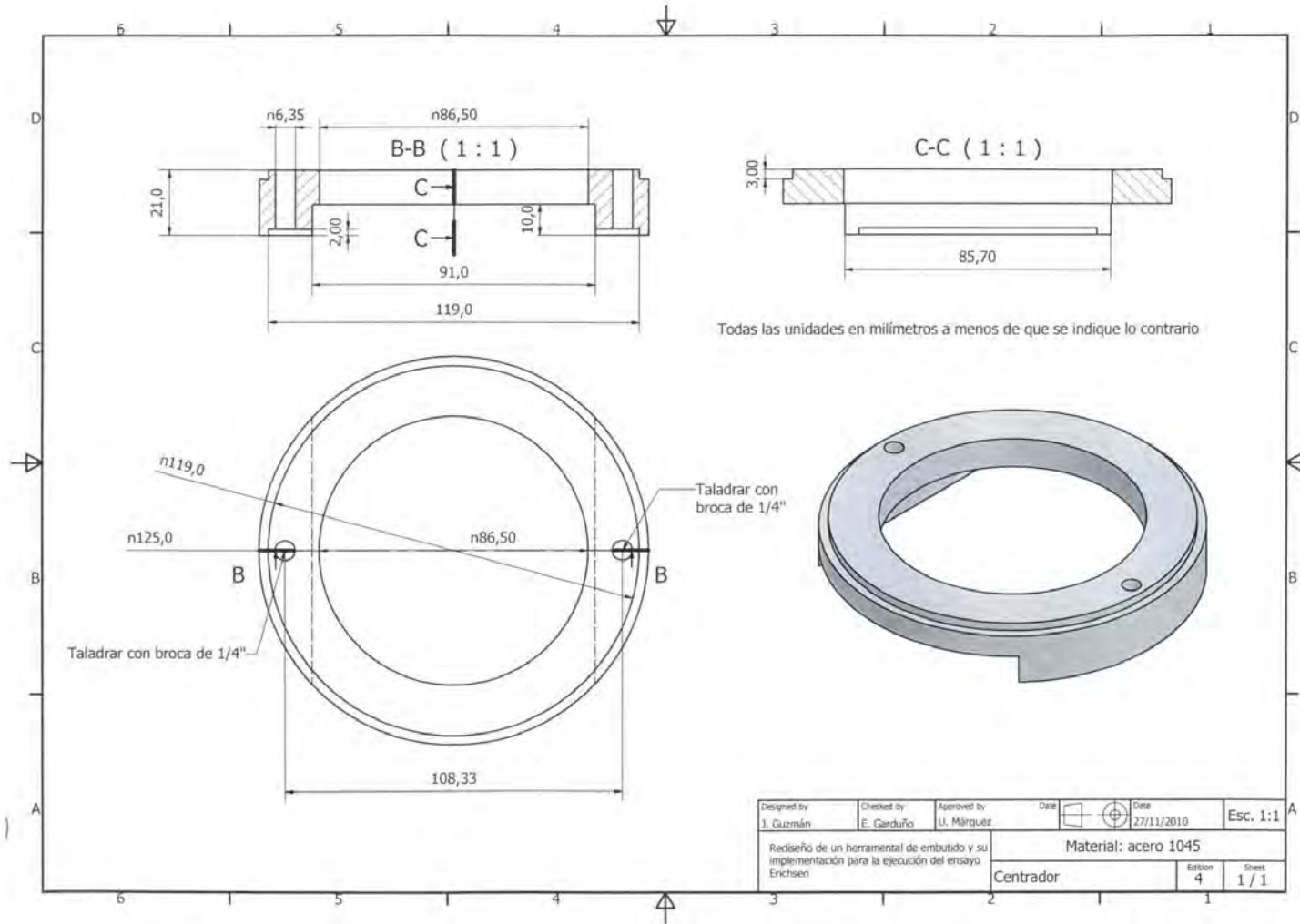


Fig. 3.14. Plano, centrador.

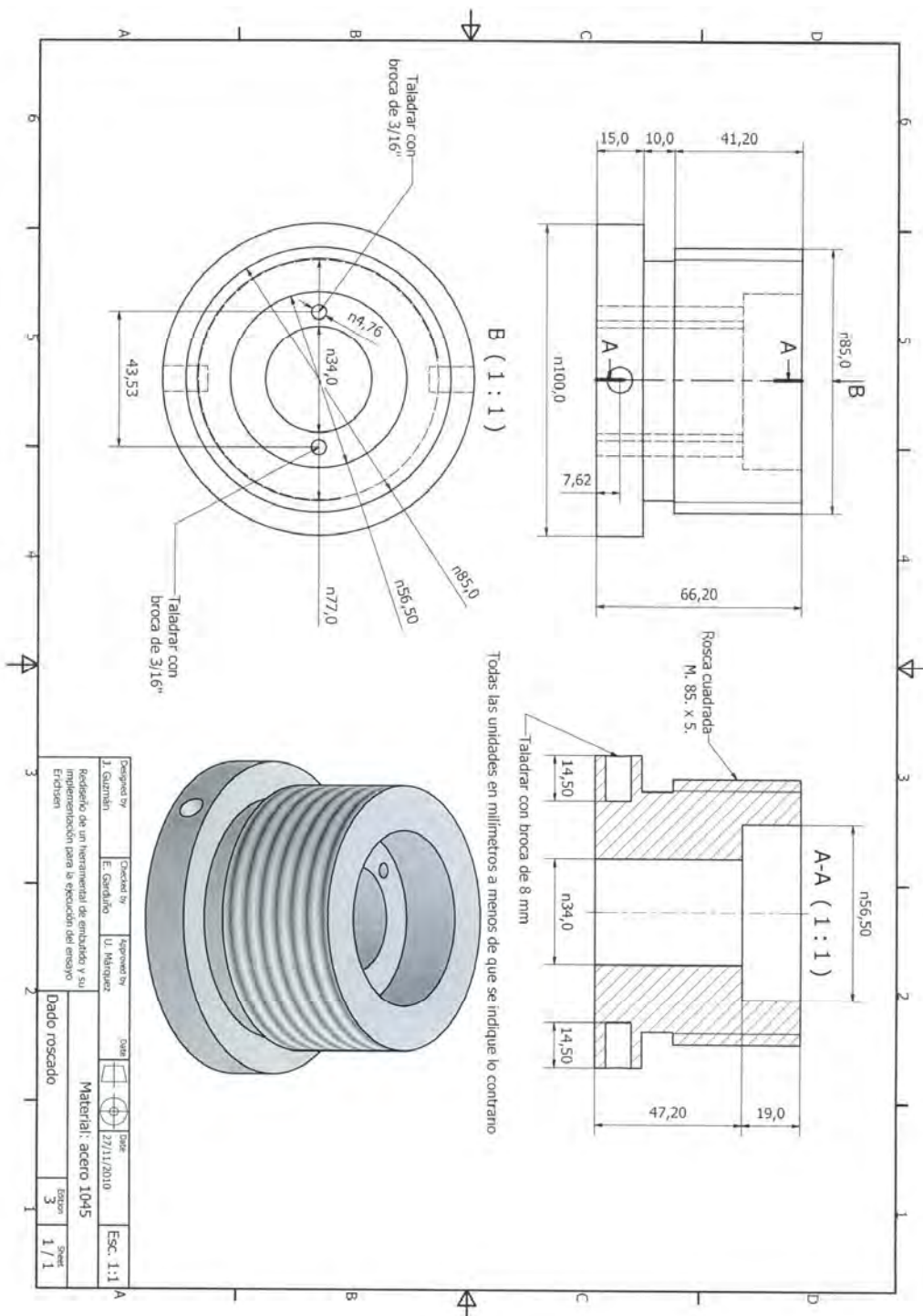


Fig. 3.15. Plano, dado roscado.



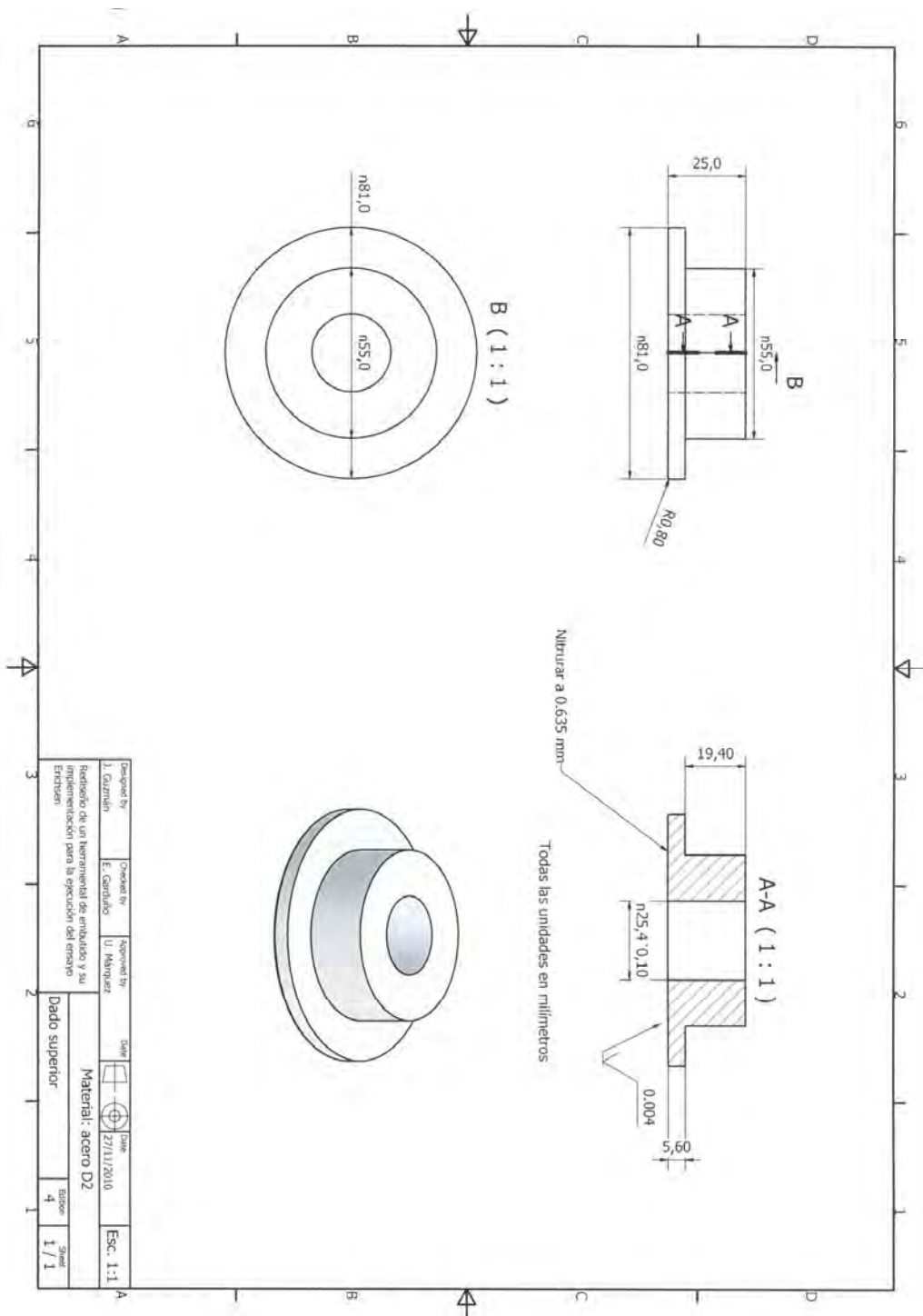


Fig. 3.16. Plano, dado superior.

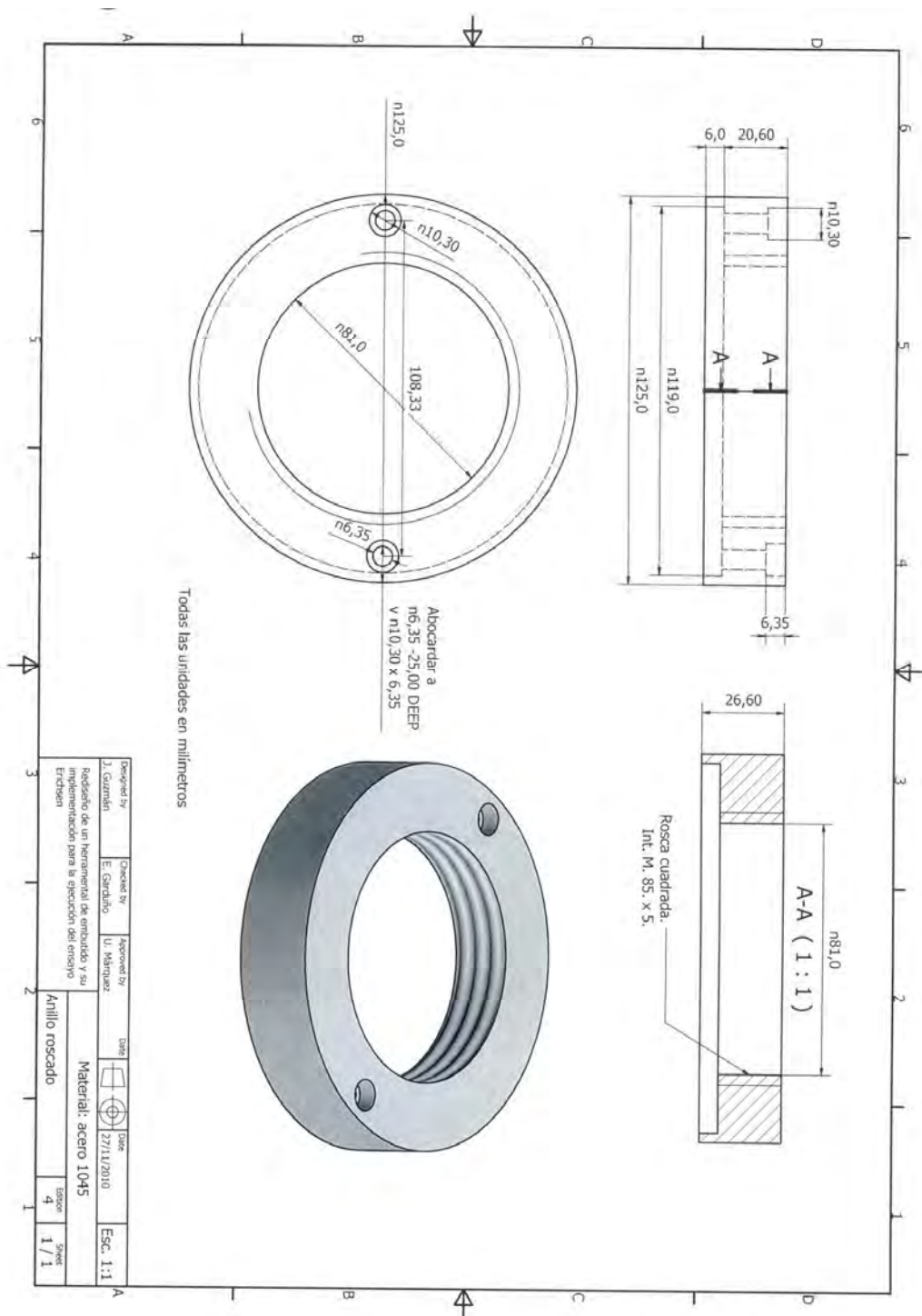


Fig. 3.17. Plano, anillo roscado.

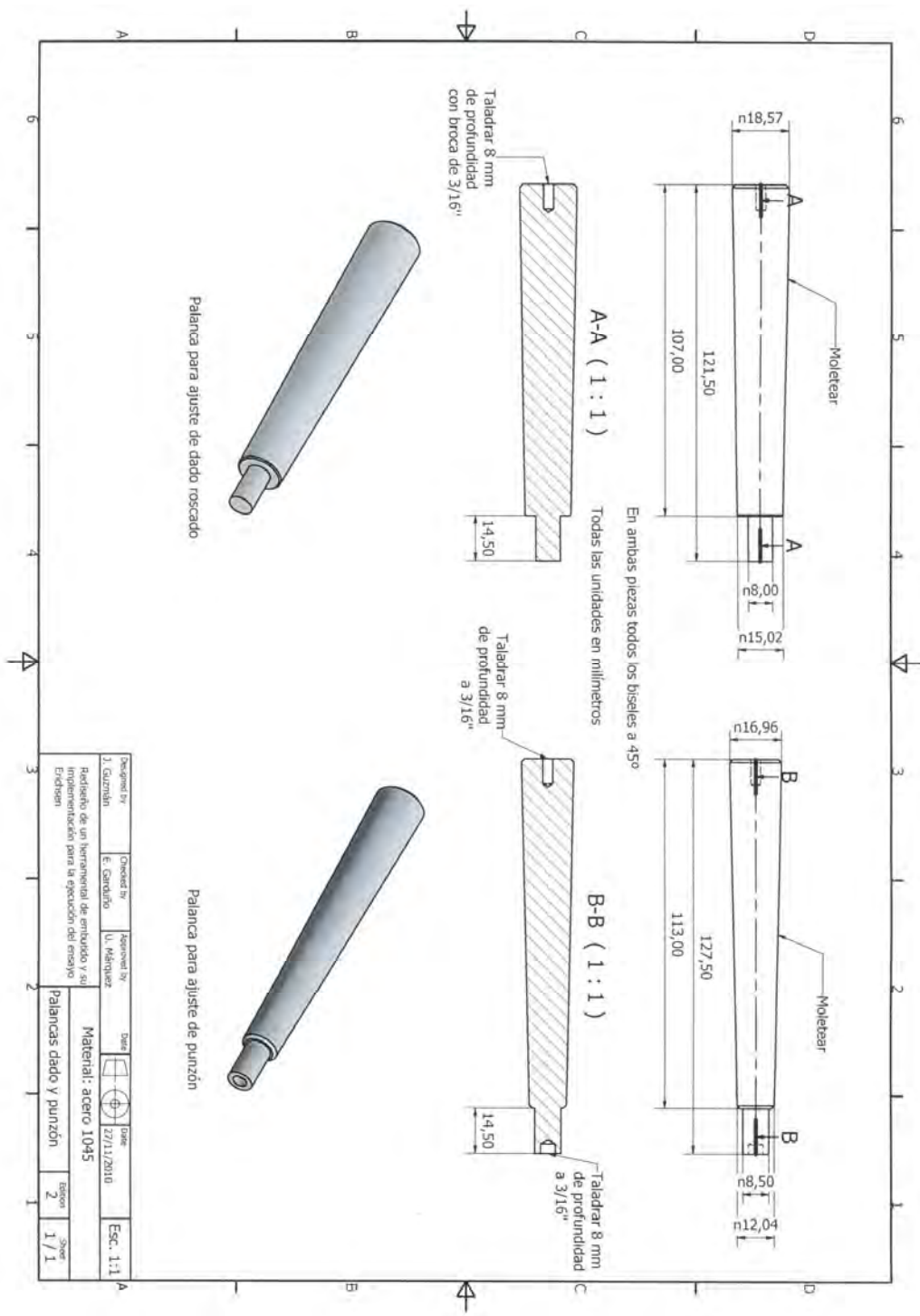


Fig. 3.18. Plano, palancas dado y punzón.

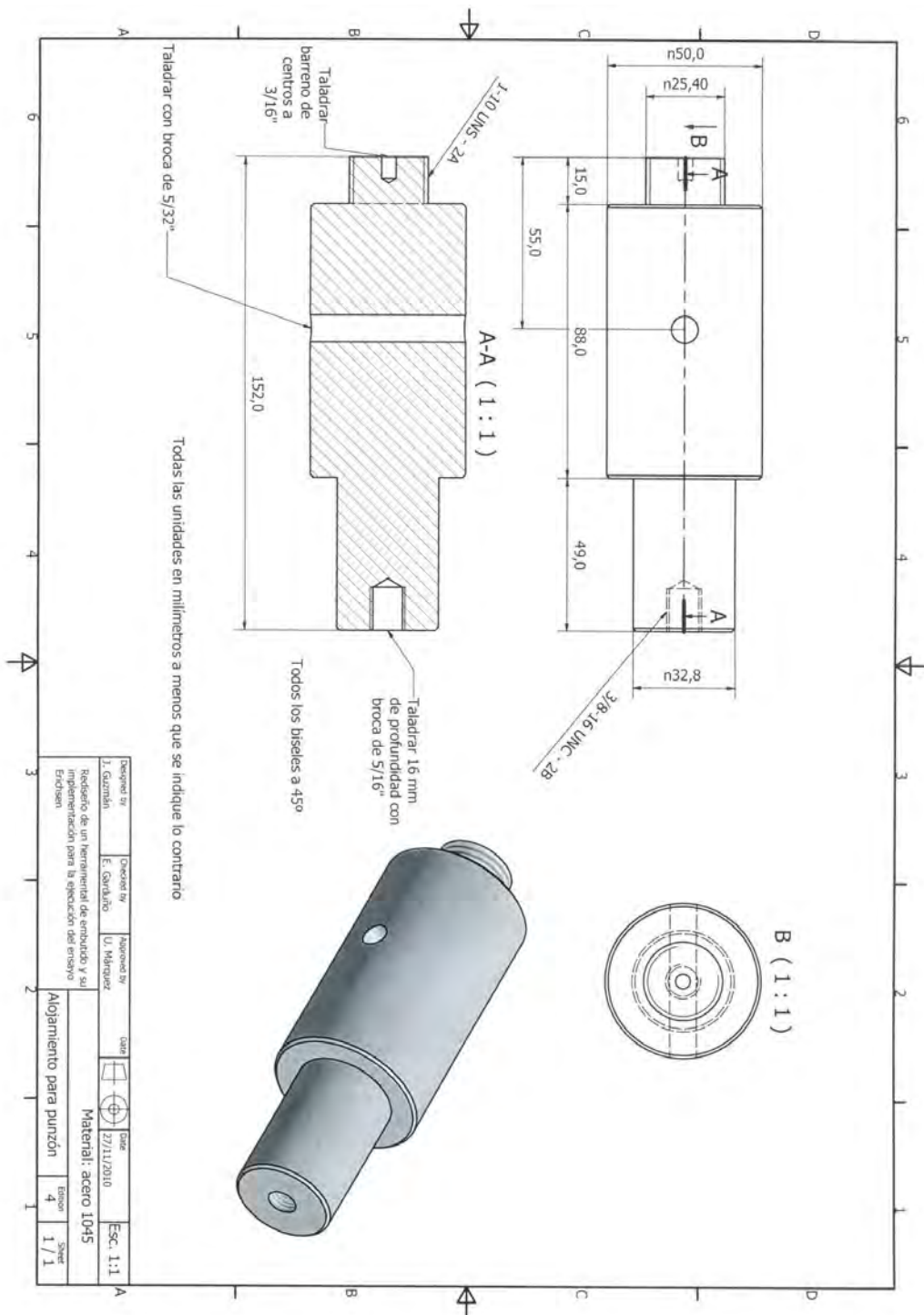


Fig. 3.19. Plano, alojamiento para punzón.

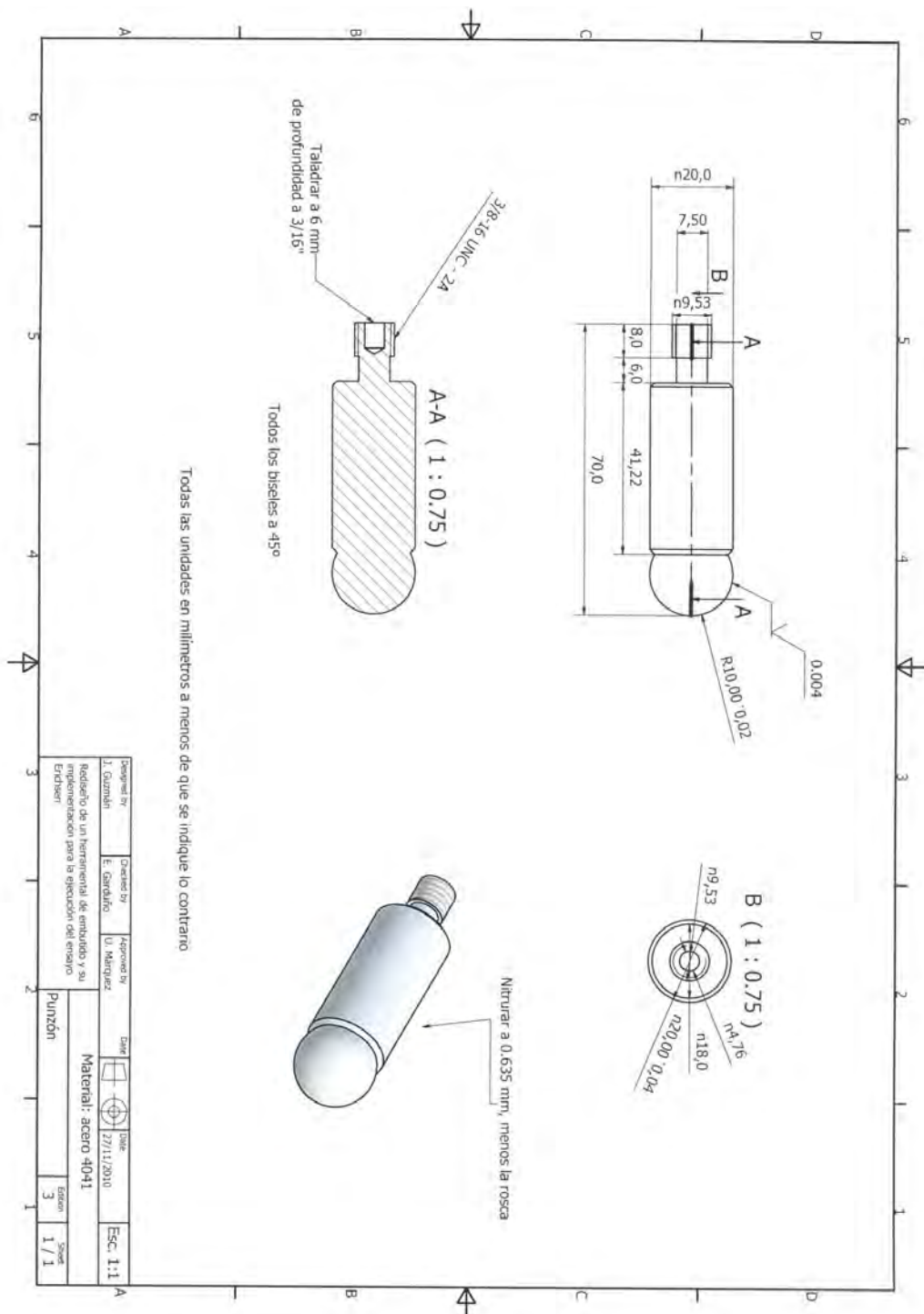


Fig. 3.20. Plano, punzón.

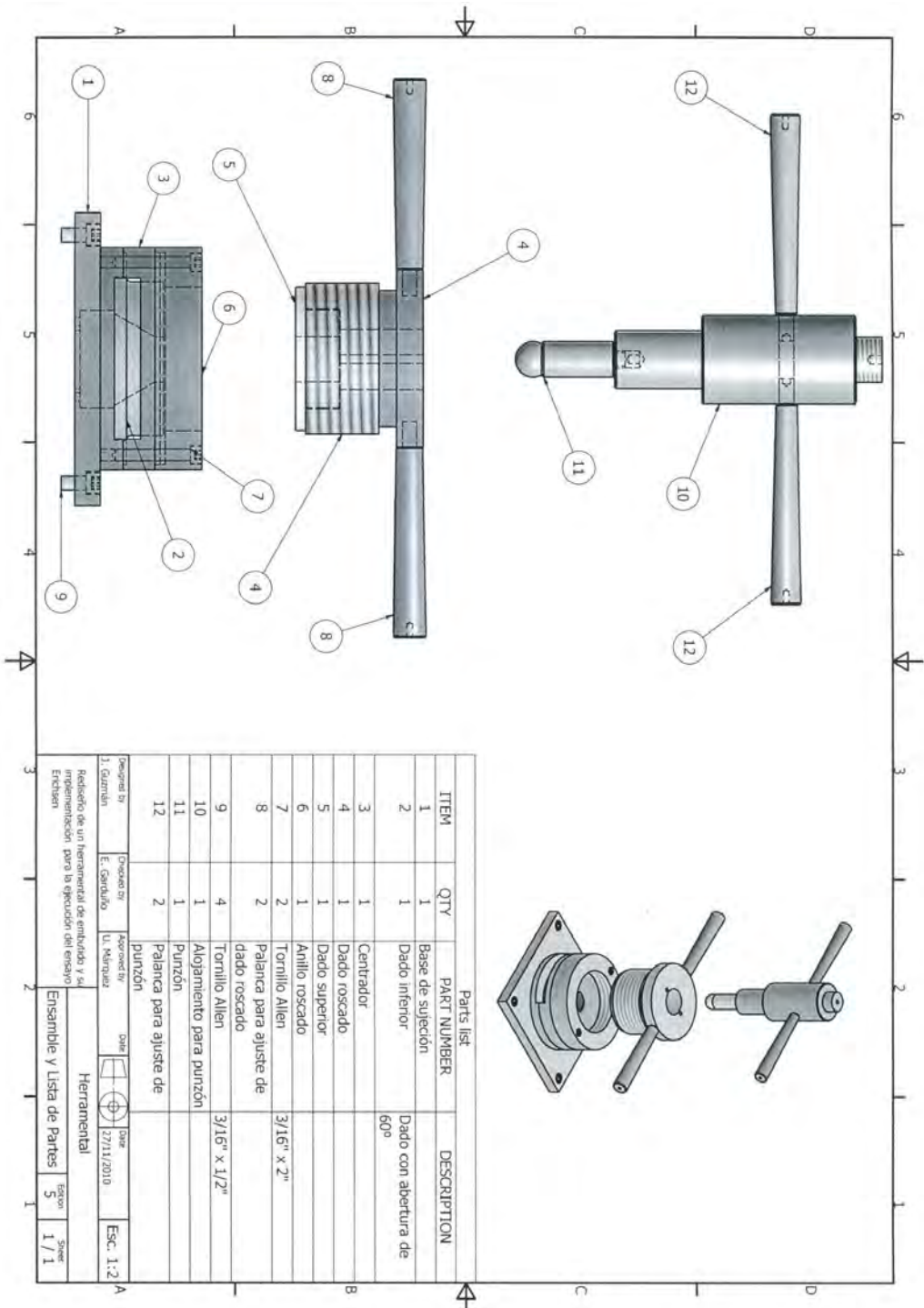


Fig. 3.21. Ensamble.

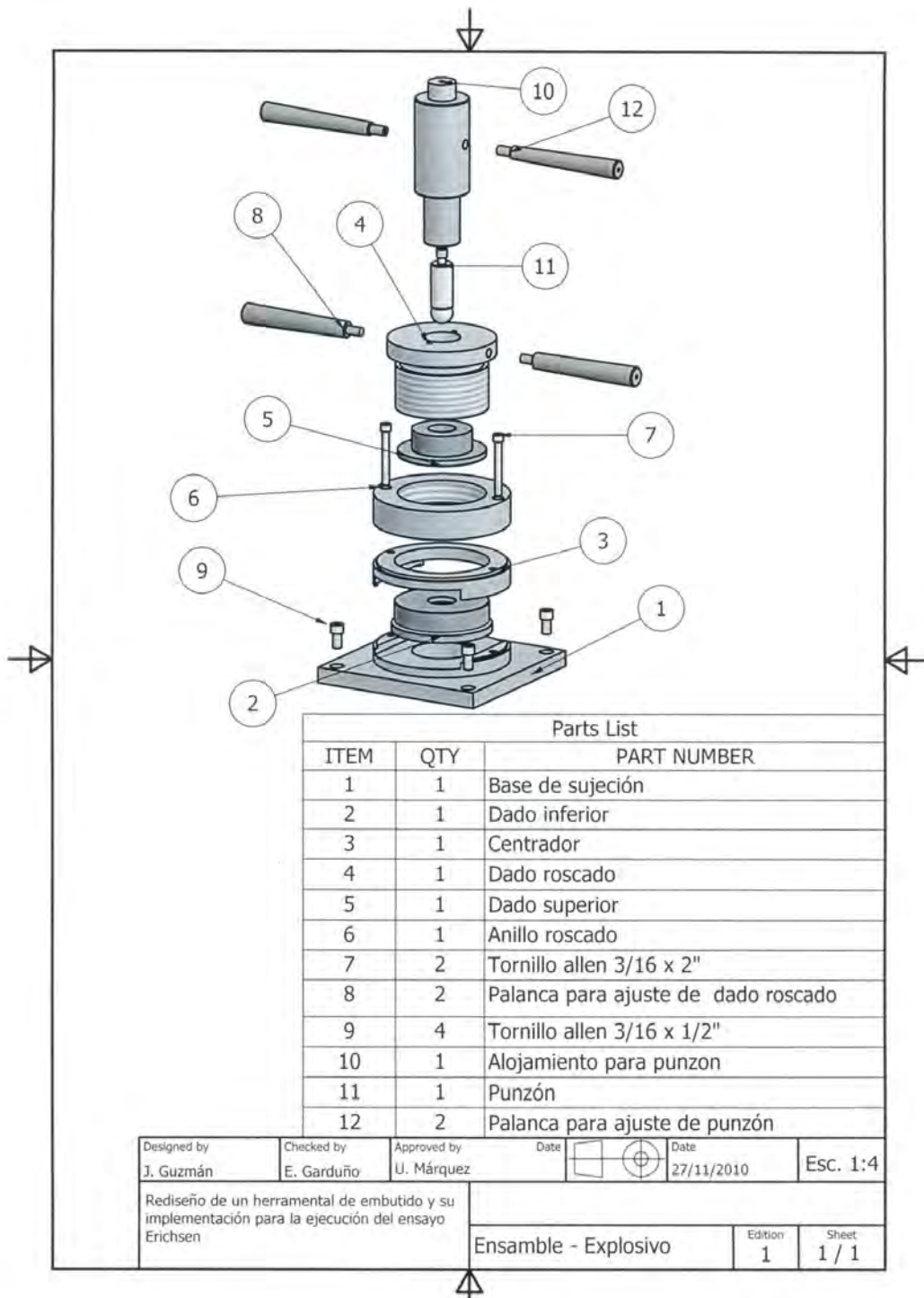


Fig. 3.22. Plano, explosivo.

#### D) MONTAJE DEL EQUIPO Y PRUEBAS PRELIMINARES

Como primer paso, previo a la experimentación directa del ensayo Erichsen, se realizó el montaje del instrumental en la máquina Instron a fin de asegurar que todas las piezas estuviesen completas así como verificar ensambles y congruencias entre partes. Antes de montar se realizó el ensamble del dado superior, el cuál se efectuó mediante calor asegurando de esta forma un ajuste de apriete.



Fig. 3.23. Ensamble del dado superior.

Tanto el punzón como la base de sujeción que son los aditamentos que entran en ensamble directo con la Instron se instalaron correctamente. El resto del instrumental se montó sin problema alguno, tal y como lo muestra la siguiente imagen.



Fig. 3.24. Montaje del instrumental en la máquina de pruebas Instron.



Por lo tanto, habiendo cumplido con las especificaciones tanto geométricas como mecánicas de la norma ASTM E643, así como haber comprobado el buen ensamble del herramental y el correcto funcionamiento de la máquina de pruebas, se procederá a realizar el ensayo Erichsen a las muestras que se tienen dispuestas para ello.

## **Capítulo IV Pruebas Mecánicas**

### **Objetivo:**

En este capítulo se expondrá la metodología con la que se lleva a cabo el ensayo Erichsen. Se presentarán los resultados obtenidos de dicha prueba tales como el índice de Erichsen así como los parámetros derivados de este indicador que permitan caracterizar la ductilidad de algunas muestras metálicas empleadas. Finalmente se realizará una simulación por elemento finito que servirá para una posterior comparación de resultados.

### **A) METODOLOGÍA DEL ENSAYO ERICHSEN**

El ensayo Erichsen esencialmente es un proceso de estirado de lámina en la que el punzón se detiene en el instante en que se produce la fractura de la muestra. Como tal no existe una estandarización absoluta que establezca lineamientos para el procedimiento de Erichsen, por lo tanto, se pueden construir o adecuar dispositivos que sigan una norma guía, puede ser de ISO, DIN, ASTM etc. Para nuestro caso de estudio nos sujetamos a las recomendaciones de ASTM bajo su norma E643 que es la rige el ensayo de deformación de lámina. Independientemente de la norma acogida, el procedimiento es básicamente el mismo: estirar una lámina sujeta por un par de dados que permitan la acción de un punzón.

La norma ASTM E643 establece condiciones en lo que respecta a la prensa a emplearse, al herramental, a las muestras de lámina y al modo de practicar los ensayos así como a los datos que deberán ser reportados.

Para el caso de la prensa, se tienen especificados los siguientes puntos:

- Equipo capaz de aplicar, cuando menos, 9800 N de carga.
- Indicador de desplazamiento.
- Con velocidad de punzón ajustable.

- Capaz de determinar la fuerza de sujeción de la muestra. En caso de no tener un dispositivo que pueda cuantificar la sujeción, ésta deberá ser establecida por algún mecanismo de cálculo (una rosca por ejemplo).

En lo que toca al instrumental se tiene la siguiente especificación:

- El punzón deberá tener una rigidez tal, que no deberá deformarse, rotar o moverse lateralmente durante la prueba. Igualmente deberá estar libre de corrosión y suciedad en general.
- Los dados deberán tener una rugosidad máxima de 0.004 mm en las caras que entren en contacto con la muestra.
- La dureza en la cabeza del punzón deberá ser, cuando menos, de 62 HRC. Las superficies de trabajo de los dados deberán contar con un mínimo de 56 HRC.

Las muestras de lámina deberán cumplir con ciertos parámetros:

- Un mínimo de tres pruebas deberán ser aplicadas a un mismo tipo de material.
- Las muestras podrán ser circulares o rectangulares, el ancho mínimo (diámetro) será de 90 mm. Se pueden considerar muestras cuadradas, siempre y cuando el centro de la copa esté a una distancia no menor a 38 mm del borde de la lámina.
- En casos en donde la máquina no permita acomodar de manera apropiada a las muestras, éstas podrán tener un ancho mínimo de 65 mm.
- El método de evaluación abarca láminas con un espesor de 0.2 hasta 2.0 mm. La abertura del dado superior será de 25.4 mm si las muestras no exceden los 1.5 mm de espesor. Si la muestra va de 1.5 a 2 mm la abertura será de 28.58 mm.

En lo relativo a la lubricación y al ensayo Erichsen, se especifica lo siguiente:

- Se podrá utilizar cualquier tipo de lubricante típico del embutido.
- No se debe de alterar mecánica o químicamente la superficie de la lámina a estudiar.
- Los dados así como la lámina no se deben lubricar a fin de evitar operaciones de embutido.

- La velocidad del punzón estará comprendida en el rango que va de 0.08 hasta 0.4 mm/s.
- El instante en que la prueba se detendrá estará marcado por la caída de carga en el punzón.
- No se considerará válida una prueba en la que la ruptura de la lámina se presente en la zona de sujeción.
- La altura de la copa formada se reportará hasta las centésimas de milímetro.
- Se considera que la prueba comienza en el instante en que el punzón hace contacto con la lámina.

El reporte de los datos generados por la prueba deberá contener la siguiente información:

- Identificación del material.
- Espesor de material.
- Método para determinar la caída de carga.
- Número de ensayos.
- Tipo de lubricante empleado.
- Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas.
- Promedio de las cargas máximas (si se conoce).
- Método de sujeción. Constante o proporcional.
- Fuerza de sujeción (si se conoce).

## **B) TOMA DE LECTURAS Y RESULTADOS EN DISTINTAS MUESTRAS DE LÁMINA**

En el capítulo III se detalló el instrumental necesario para la realización del ensayo Erichsen y uno a uno de los componentes se ha verificado para estar dentro del estándar de ASTM. Por parte de la máquina también se puede considerar que estamos dentro e incluso, sobradamente en el rango que la norma especifica.

Para realizar los ensayos se prepararon muestras cuadradas de distintos tipos de láminas, entre las cuales tenemos:

- lámina de acero calibre 18
- lámina de acero calibre 22

- lámina de cobre en varios espesores (0.9, 0.65 y 0.75 mm.)

La máquina de pruebas se graduó para operar con los siguientes parámetros:

- Velocidad del punzón: 0.254 mm/s, lo cual representa un valor aproximadamente intermedio al rango especificado (de 0.08 a .4 mm/s)
- Carga máxima: 2000 Kg.

Una vez que la máquina se calibró, se procedió a ejecutar algunas pruebas, los resultados que la máquina arroja son gráficos y se obtienen en formas similares a la figura 4.1.

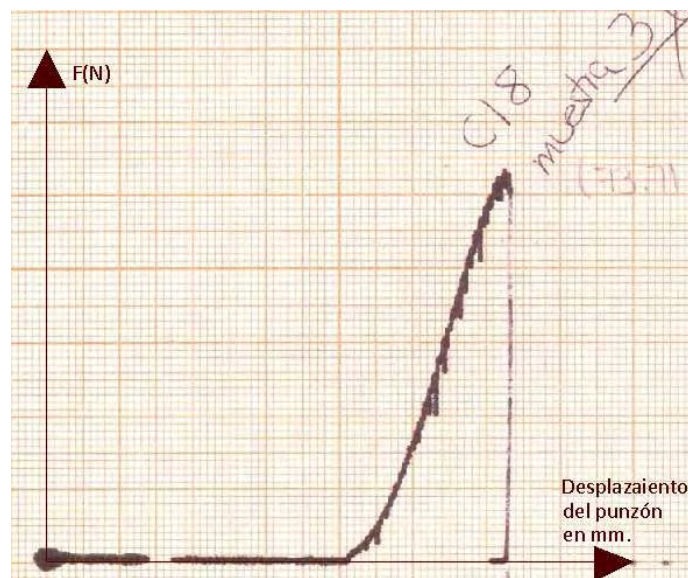


Fig. 4.1. Gráfica obtenida en máquina de pruebas para lámina de acero calibre 18. En el eje de las abcisas aparece la fuerza F en Newton, de la máquina de pruebas. En el eje de las ordenadas se grafica el desplazamiento del punzón.



Fig. 4.2. Aspecto de las muestras de cobre de 0.9 mm después del ensayo.

Para tener una escala más precisa y de esa forma eliminar el ruido de la máquina, las gráficas de papel milimétrico serán vectorizadas en un CAD para obtener curvas limpias así como para precisar con mayor detalle el punto de ruptura del material.

A continuación se presentan los resultados para cada muestra.

- **Lámina de acero calibre 18. (1.22 mm)**

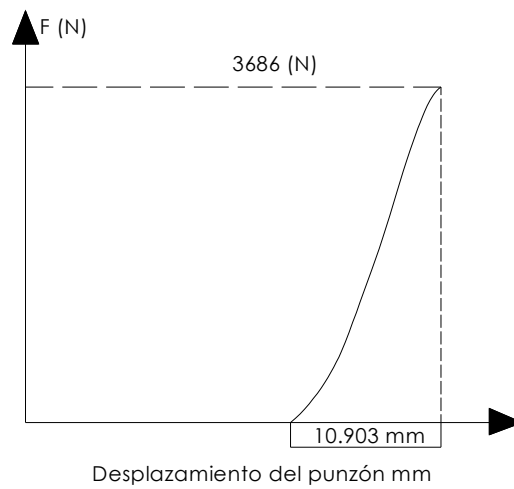


Fig. 4.3. Curva promediada de los 3 ensayos. Lámina de acero calibre 18.

- <b>Espesor de material:</b> calibre 18 (1.22 mm)
- <b>Método para determinar la caída de carga:</b> cambio de concavidad en la gráfica.
- <b>Número de ensayos:</b> 3.
- <b>Tipo de lubricante empleado:</b> grasa animal.
- <b>Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas:</b> 10.903 +/- 0.3 mm.
- <b>Promedio de las cargas máximas:</b> 3686 N.
- <b>Método de sujeción:</b> constante.
- <b>Fuerza de sujeción:</b> rosca de 2000 kg. De presión.

- **Lámina de acero calibre 22 (0.70 mm)**

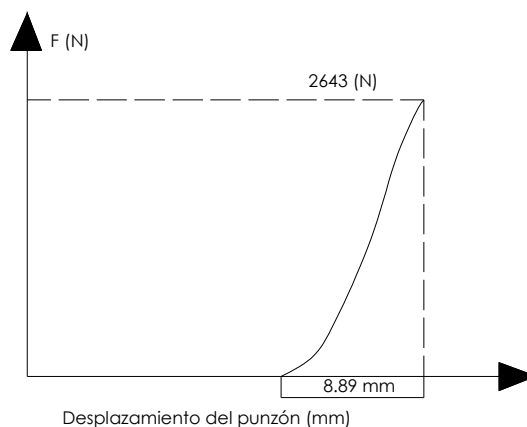


Fig. 4.4. Curva promediada de los 3 ensayos. Lámina de acero calibre 22.

- <b>Espesor de material:</b> calibre 22 (0.7 mm)
- <b>Método para determinar la caída de carga:</b> cambio de concavidad en

la gráfica.
- <b>Número de ensayos:</b> 3
- <b>Tipo de lubricante empleado:</b> grasa animal.
- <b>Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas:</b> 8.89 +/- 0.25 mm
- <b>Promedio de las cargas máximas:</b> 2643 N
- <b>Método de sujeción:</b> constante
- <b>Fuerza de sujeción:</b> rosca de 2000kg de presión.

- **Lámina de cobre, 0.65 mm de espesor.**

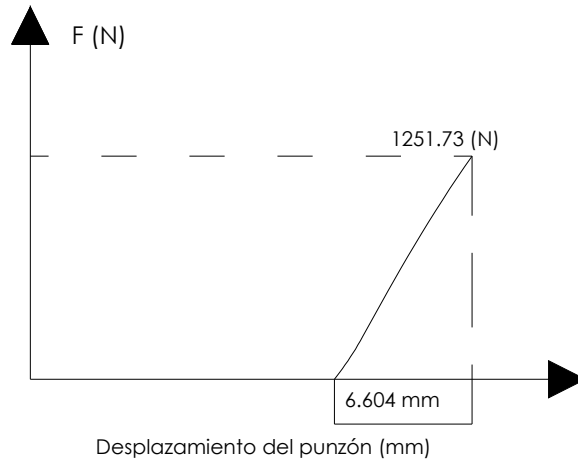


Fig. 4.5. Curva promediada de los 3 ensayos. Lámina de cobre de 0.75 mm de espesor.

- <b>Espesor de material:</b> 0.65 mm
- <b>Método para determinar la caída de carga:</b> cambio de concavidad en la gráfica.
- <b>Número de ensayos:</b> 3
- <b>Tipo de lubricante empleado:</b> grasa animal.
- <b>Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas:</b> 6.604 +/- 0.15
- <b>Promedio de las cargas máximas:</b> 1251.73 N
- <b>Método de sujeción:</b> constante
- <b>Fuerza de sujeción:</b> rosca de 2000kg de presión.

- **Lámina de cobre, 0.75 mm de espesor.**

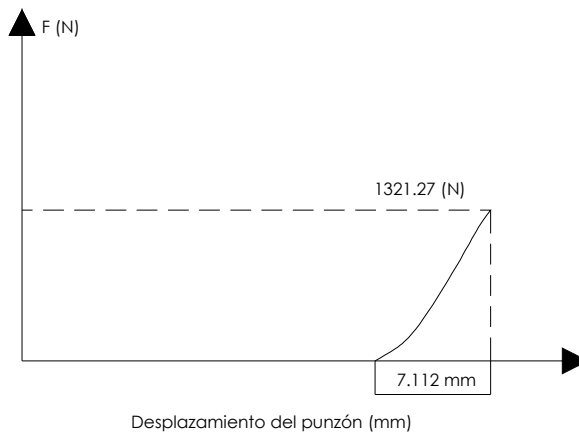


Fig. 4.6. Curva promediada de los 3 ensayos. Lámina de cobre de 0.75 mm de espesor.

- <b>Espesor de material:</b> 0.75 mm
- <b>Método para determinar la caída de carga:</b> cambio de concavidad en la gráfica.
- <b>Número de ensayos:</b> 3
- <b>Tipo de lubricante empleado:</b> grasa animal.
- <b>Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas:</b> 7.112 +/- 0.12
- <b>Promedio de las cargas máximas:</b> 1321.27 N
- <b>Método de sujeción:</b> constante
- <b>Fuerza de sujeción:</b> rosca de 2000kg de presión.

- Lámina de cobre, 0.9 mm de espesor.

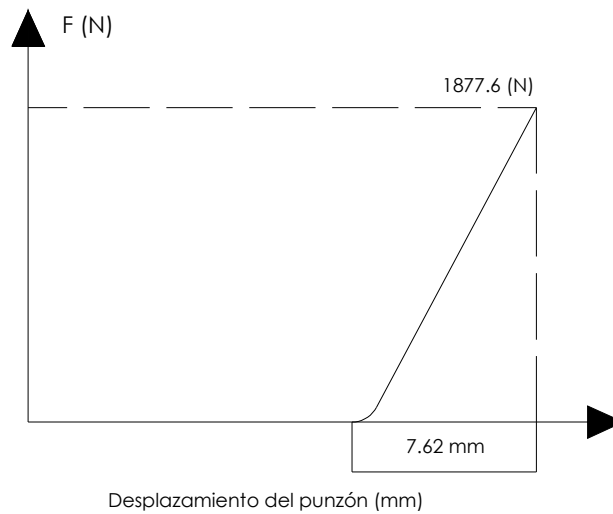


Fig. 4.6. Curva promediada de los 3 ensayos. Lámina de cobre de 0.9 mm de espesor.

- <b>Espesor de material:</b> 0.9 mm
- <b>Método para determinar la caída de carga:</b> cambio de concavidad en la gráfica.
- <b>Número de ensayos:</b> 3
- <b>Tipo de lubricante empleado:</b> grasa animal.
- <b>Valor promedio y rango de la altura de las copas formadas:</b> 7.62 +/- 0.05
- <b>Promedio de las cargas máximas:</b> 1877.6 N
- <b>Método de sujeción:</b> constante
- <b>Fuerza de sujeción:</b> rosca de 2000kg de presión.



### C) OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE ERICHSEN Y CURVAS DERIVADAS DEL ENSAYO

La literatura tiene registrado el comportamiento de algunos metales en el ensayo Erichsen, las curvas de formabilidad o de ductilidad de acuerdo a (9) se presentan de la siguiente manera.

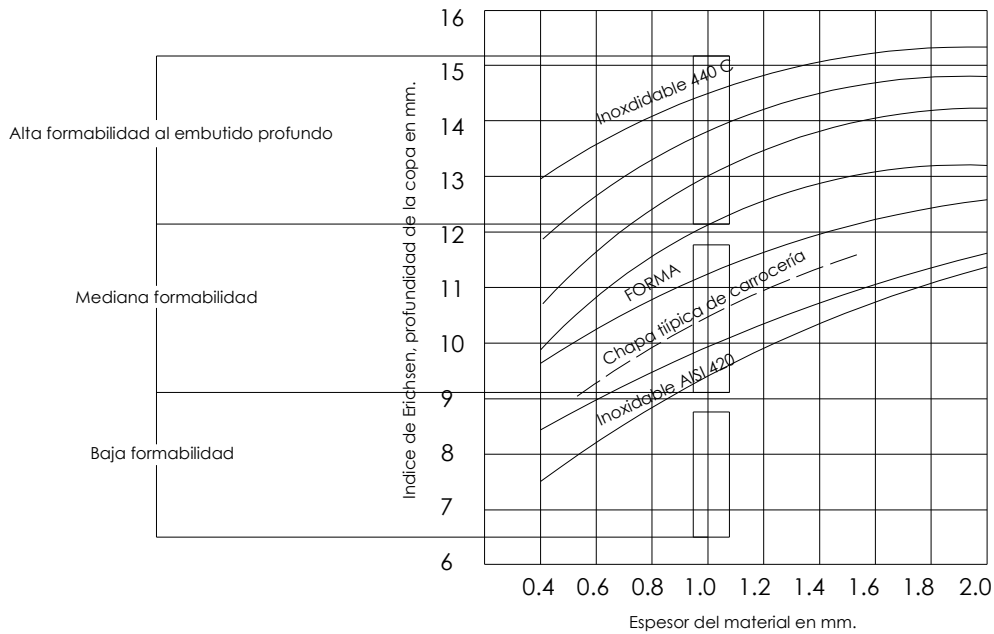


Fig. 4.7. Curvas características del ensayo Erichsen, diversos materiales, (9)

Construyendo curvas como las de la figura 4.7 pero acordes con los datos de los ensayos practicados se obtiene un gráfico como el siguiente, figura 4.8.

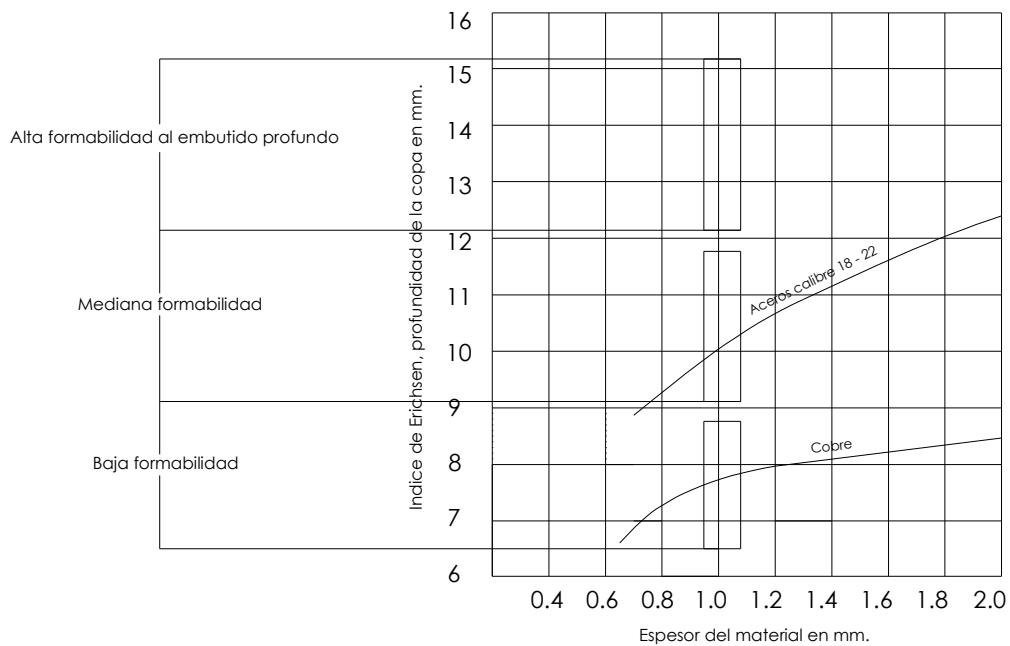


Fig. 4.8. Curvas obtenidas en las muestras ensayadas

En lo que respecta a la relación límite de embutido versus anisotropía del material (3), se deduce que la RLE es una constante para todas las muestras debido a que se emplearon geometrías cuadradas idénticas para todos los ensayos, siendo este valor el siguiente, de la ecuación 2.1

$$RLE = \frac{D_b}{D_p} \quad (2.1)$$

Donde:

$D_b$  = diámetro del disco a embutir,  $D_b = 77.5$  mm

$D_p$  = diámetro del punzón.  $D_p = 20$  mm.

$$RLE = \frac{77.5}{20} = 3.875$$

Compilando un cuadro en el que se muestre la anisotropía teórica de las muestras y su respectivo rango de alturas

Material	r	Rango de las copas formadas en milímetros
Aceros de bajo contenido de carbono laminados en frío	1 – 1.35	8.89 – 10.903
Cobre laminado en frío	0.8 – 1	6.6 – 7.62

Se presenta a continuación un gráfico en el que se condensa la información de la altura de las copas (índice de Erichsen) contra el material ensayado.

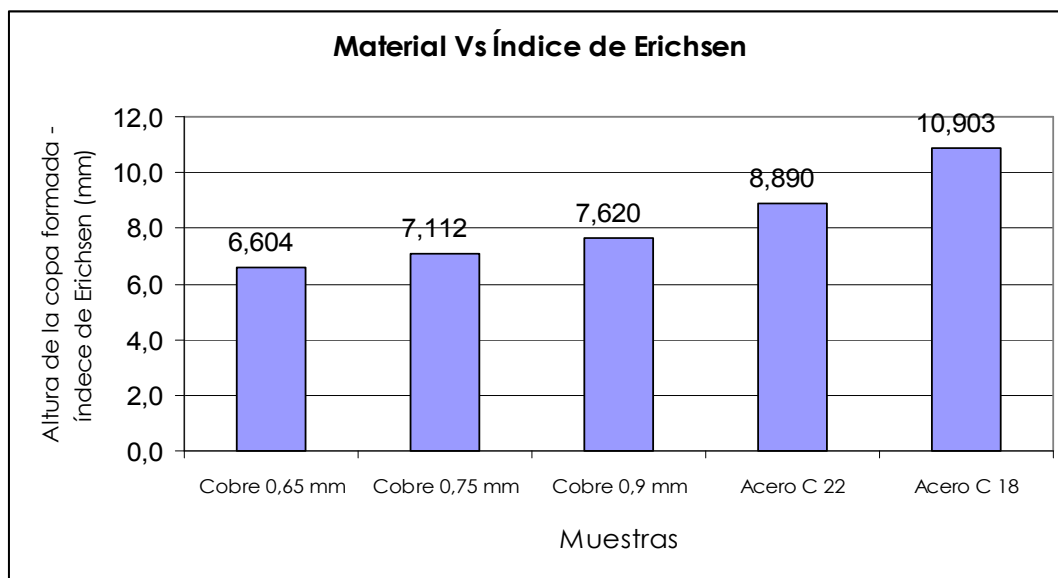


Fig. 4.9. Gráfico de materiales y la tendencia obtenida en la altura de la copa en relación con su espesor.

## D) SIMULACIÓN DEL ENSAYO ERICHSEN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

Se realizó la simulación por elemento finito del ensayo en todas las láminas. La simulación tiene como fin encontrar coincidencias entre los procesos reales y los cálculos numéricos. Se muestra únicamente la simulación de dos láminas puesto que todas las simulaciones son gráficamente similares variando únicamente la barra de colores que indica el esfuerzo que se produce en el material ante la carga del punzón teniendo como variante su espesor. En el capítulo V se analizarán a detalle los resultados de la simulación.

La simulación tuvo como objetivo obtener los esfuerzos resultantes en los materiales a partir de programar la velocidad y el desplazamiento del punzón, esto es, conociendo la altura de la copa y la velocidad con la que fue ajustada la máquina de pruebas.

Dentro de las condiciones de la simulación podemos decir que se emplearon materiales típicos, se supuso lámina de acero 1018 laminada en frío; en el caso del cobre se consideró lámina con propiedades típicas de este elemento. A nivel de software los parámetros y las condiciones de frontera fueron las siguientes:

- Se consideraron fuerzas de superficie, se supuso que el punzón sólo actuaba en una región de la lámina y que sus efectos eran despreciables fuera de un radio mayor a 20 mm medidos a partir del centro de la lámina (Fig. 4.8).
- El material, acero y cobre, se consideró liso y anisotrópico.
- Las propiedades mecánicas del acero y el cobre fueron consideradas típicas, en el caso del acero se eligió como material lámina de bajo contenido de carbono (acero 1018). El cobre fue seleccionado como típico para trabajo en frío. Para el caso de los dados y el punzón se seleccionó acero D2.
- Dentro de las condiciones de frontera se supuso que la lámina estaba completamente estática, sin movimiento, ya sea de rotación o traslación en algún eje coordenado. Al punzón sólo se le permitió desplazarse en un eje omitiendo cualquier rotación. Los dados se mantuvieron como elementos estáticos con cero desplazamientos entre éstos y la lámina (Fig.4.9).

- La velocidad del punzón estableció en 0.254 mm/s

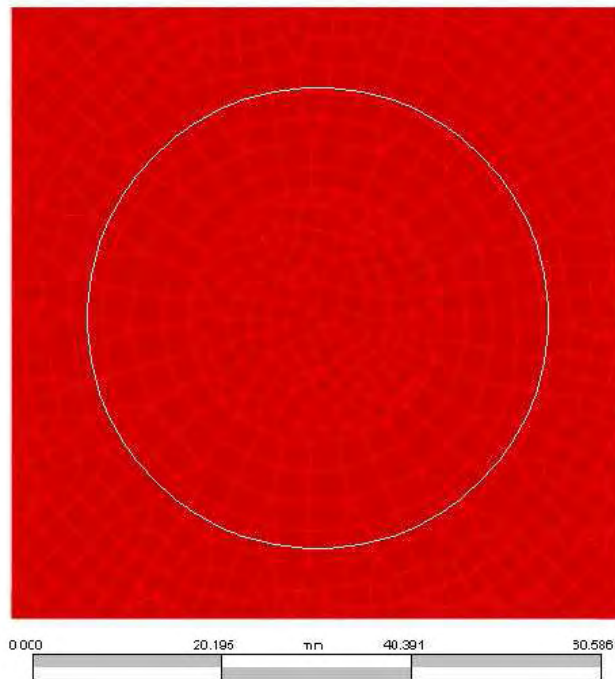


Fig. 4.8. Fuerzas de superficie en la simulación, el mallado se refinó en un área con un radio de 20 mm a fin de concentrar en esa área el cálculo de los esfuerzos.

El programa empleado fue Algor V17. Los resultados son los siguientes.

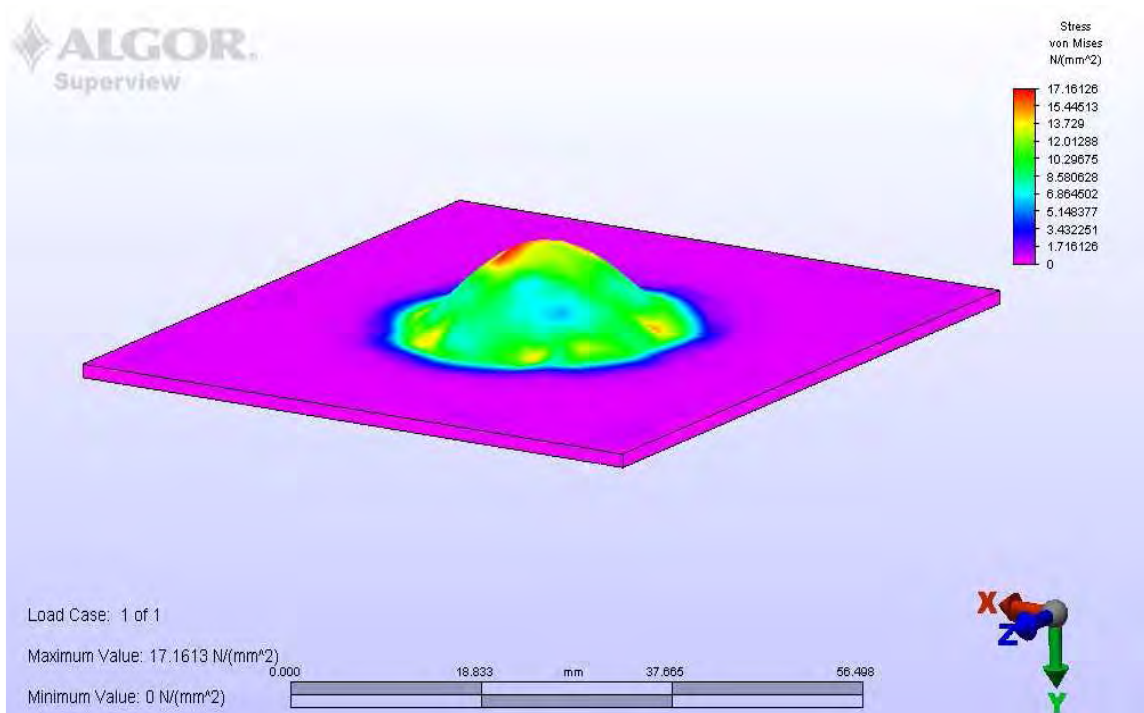


Fig. 4.8. Mapa de colores de los esfuerzos resultantes en la lámina de acero calibre 18.

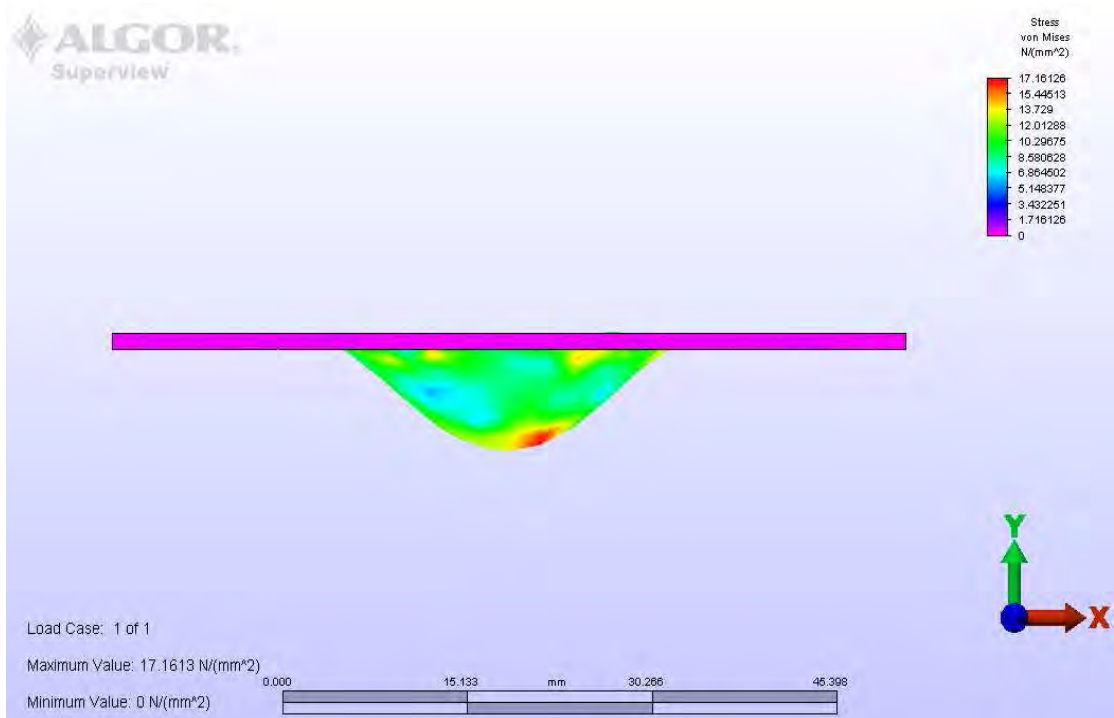


Fig. 4.9. Mapa de colores de los esfuerzos resultantes en la lámina de acero calibre 18, vista frontal en el formado de la copa.

Para el cobre, los resultados son los siguientes.

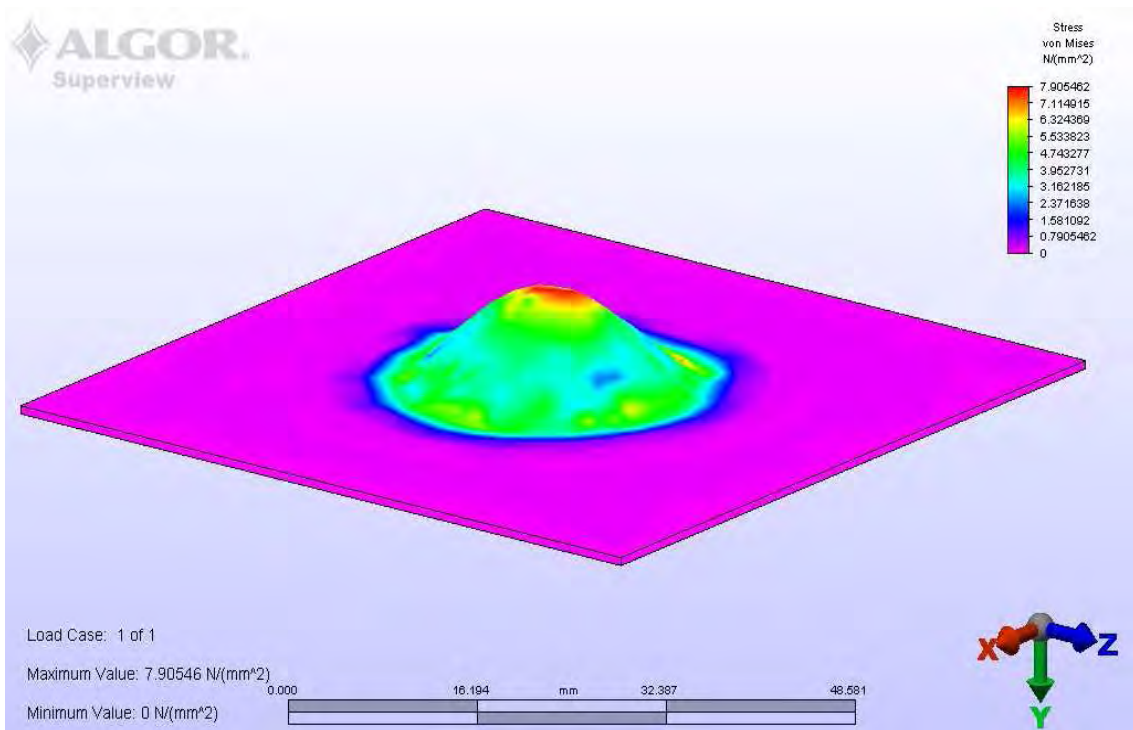


Fig. 4.11 Mapa de colores de los esfuerzos resultantes en la lámina de cobre de 0.65 mm de espesor.

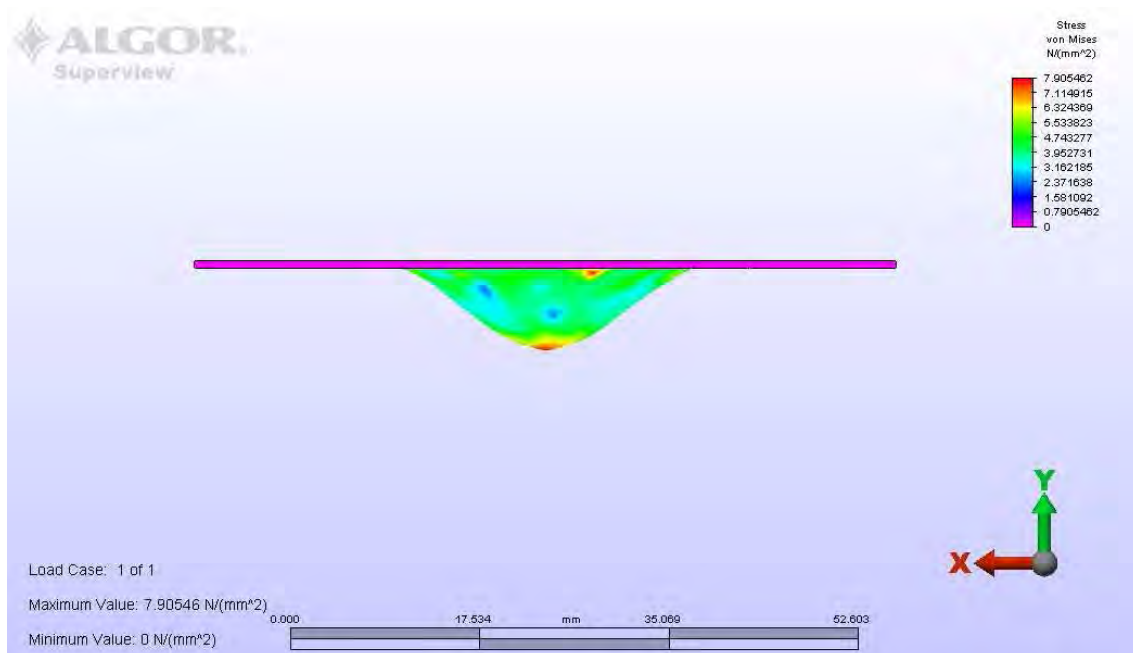


Fig. 4.12. Mapa de colores de los esfuerzos resultantes en la lámina cobre de 0.65mm, vista frontal en el formado de la copa.

Posterior a la simulación por elemento finito se recurrió a un sistema de digitalización en donde las muestras fueron escaneadas. La digitalización tiene un sinnúmero de aplicaciones, en el área de la ingeniería mecánica se emplea como una fuente de inspección dimensional y control de calidad de cualquier tipo de parte, sea de plástico, metal, cerámico etc. Nos permite además conocer el espesor final de productos derivados del estampado; también se puede emplear para realizar el modelado mediante ingeniería inversa de partes cuyo diseño en CAD no existe o para modelar herramental de estampado (matrices y punzones) toda vez que ha sido compensado mediante maquinados casi-artesanales. En pocas palabras, la digitalización es un paso delante de la típica medición por máquinas de coordenadas. Para nuestro caso particular emplearemos un digitalizador GOM ATOS III, que nos permitirá discutir con más detalle los resultados obtenidos por la simulación de elemento finito, así como para darle certeza a las gráficas elaboradas por el seguidor de la máquina de pruebas. La discusión de resultados se dará en el capítulo V.

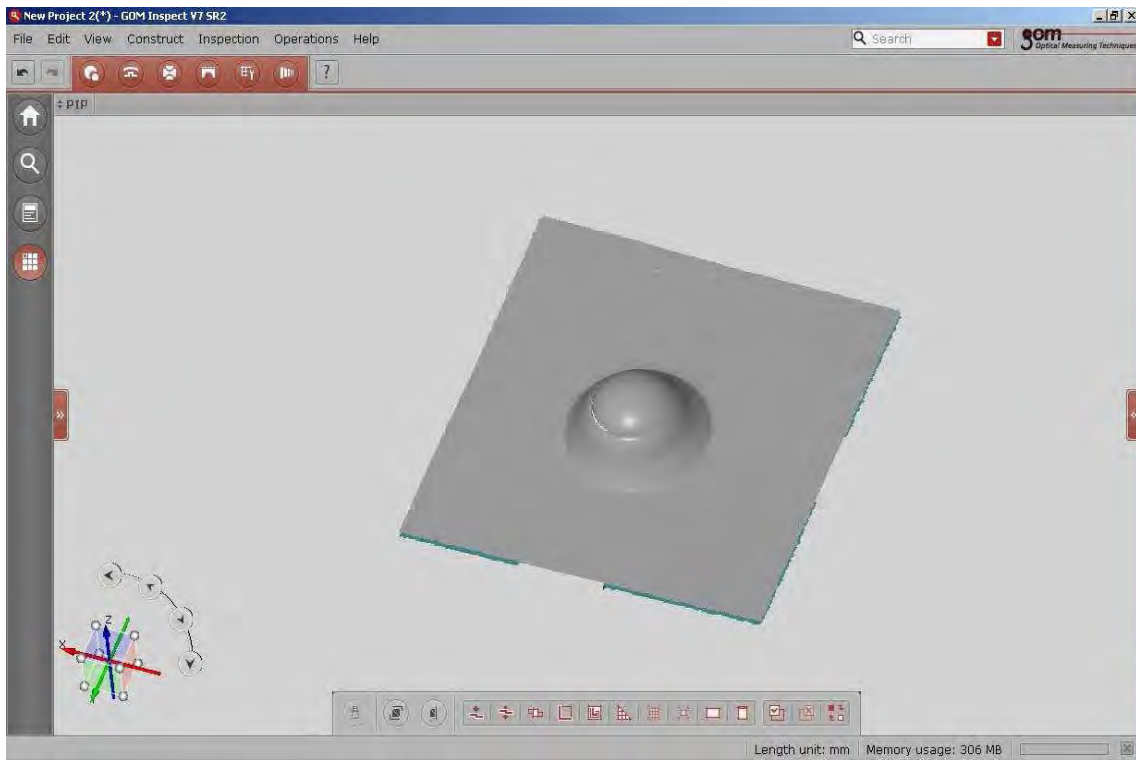


Fig. 4.14. Digitalización de la lámina de cobre con un rango de medición de 150 mm.

## Capítulo V Conclusiones

Los resultados que se han ido recabando a lo largo de este trabajo permiten derivar una serie de conclusiones y comentarios que esbozarán un panorama sobre los alcances del Ensayo Erichsen y la manera en que lo aplicamos de acuerdo a nuestras condiciones, tanto de infraestructura a nivel prensa como de las herramientas de software que se tienen al alcance.

A nivel del herramental poco o nada se puede agregar, únicamente se hizo lo posible por aprovechar al máximo un herramental de embutido que años atrás se había construido. Se contó con la fortuna de tener una serie de herramientas que permitían adaptarse a una nueva función, sobre todo el punzón cuyas dimensiones se ajustaban perfectamente a las necesidades de la norma ASTM para poder llevar a cabo nuestro objetivo. El antiguo herramental se remaquinó en algunas zonas, ésto con la finalidad de remover restos de un tratamiento térmico así como la de generar cavidades o rectificar zonas que permitieran el adecuado ensamble con un par de dados que había que fabricar. La construcción de los dados y su posterior tratamiento térmico de nitruración llevado a cabo en una empresa especializada en el endurecimiento de aceros nos permite afirmar, categóricamente, que tenemos un herramental de calidad, que además está normalizado no solamente en dimensiones sino en dureza y rugosidad.

Ahora bien, dejando de lado el aspecto del herramental, nuestra atención se centra en discutir los resultados de los diversos ensayos. Un punto sustancial que debemos tocar es que el ensayo Erichsen no es una prueba concluyente ni contundente, sin embargo tiene la bondad de trazar un panorama muy aproximado al desempeño de la lámina en el momento de entrar en la línea de producción, entendiéndose por desempeño la capacidad que tendría el metal para deformarse de una manera severa.



De las muestras analizadas, el acero muestra su natural tendencia a ser empleado como material de estampado, un comparativo entre el cobre y el acero lo podemos ver en la lámina calibre 22 y el cobre con espesor de 0.75 mm, ambos son similares en espesor (una diferencia de 0.05 mm a favor del cobre). Tanto la resistencia al estirado como la altura de la copa muestran claramente que el acero tiene un desempeño superior al cobre, podemos sintetizar el comentario en una tabla.

<b>Material</b>	<b>Altura de las copas (mm)</b>	<b>Fuerza de ruptura (N)</b>	<b>Promedio de los esfuerzos (MPa)</b>
Lámina de acero 1018 calibre 22	8.89 +/- 0.25	2643	8.14
Lamina de cobre de 0.75 mm	7.112 +/- 0.12	1321.27	4.20

Si bien es cierto que el acero requiere de una mayor fuerza para deformarse y que el promedio de los esfuerzos reportado es casi del doble que el del cobre, no debemos perder de vista que la deformación por trabajo en frío se traducirá en piezas de mayor resistencia, útiles en múltiples aplicaciones, como en carrocerías automotrices que requieren partes de determinada resistencia para soportar posibles impactos y todo esto se puede lograr con el acero a un costo competitivo.

En este ejercicio en particular se puede aplicar un 'criterio de Erichsen', notamos cómo el acero se estira a una altura mayor y tiene por consecuencia una resistencia superior a la del cobre, sin embargo, éste último demuestra que es más dúctil que la aleación de hierro. Si dividimos la altura entre la fuerza de ruptura tendríamos que, para ganar un milímetro de altura de copa en el cobre se requieren de 185 N de carga, mientras que para lograr un desplazamiento igual en el acero se necesitan 297.3 N.

Hablando acerca de la apariencia física de las muestras posteriores al ensayo, salta a la vista un detalle: la zona de fractura no es exactamente en el área más alta de la copa como teóricamente se esperaría. Se aprecia que existe una tendencia al desgarramiento en la parte adyacente a la cresta de la copa. Investigando en algunas publicaciones de universidades hay un documento procedente de la

universidad de Dinamarca (5) en el que prácticamente realizan el mismo experimento que en este trabajo se ha llevado a cabo, aunque su punto de análisis es otro. En Dinamarca ocurrió la misma situación, la falla no se presentó precisamente en la zona teórica de ruptura sino en las inmediaciones de la misma. Los daneses explican el desplazamiento de la fractura como resultado de la anisotropía en el material, esto es, materiales con defectos internos que evitan que las propiedades mecánicas de los mismos no sean constantes a lo largo y ancho de su geometría, por ello, la zona de falla teórica se desplaza hacia los costados de la copa. Como comparativa entre los experimentos de Chaker-Akrouf y el que se realizó con nuestro instrumental se expone la siguiente imagen en donde se aprecia el área de ruptura.

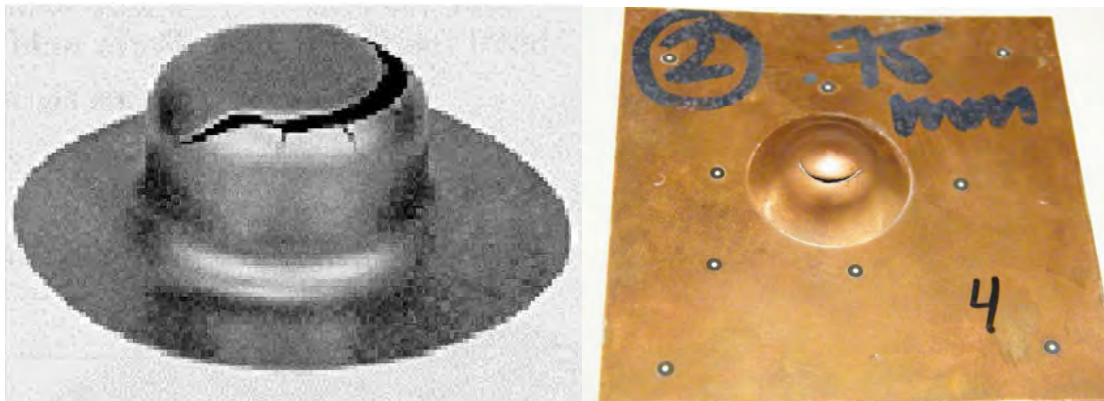


Fig. 5.1. A la izquierda se muestra la lámina ensayada en la Universidad de Dinamarca con una notoria ruptura en el área circundante a la altura de copa máxima (5). A la derecha se aprecia una muestra de cobre ensayada con instrumental desarrollado en este trabajo.

Como se demostró en el párrafo anterior, existe un punto en el que la teoría se desprende de la realidad, para profundizar en dicho punto se recurrió a la tecnología de la digitalización. Se escanearon las muestras con un digitalizador GOM ATOS III, con dos objetivos, el primero de ellos fue para realizar la inspección dimensional de las copas y obtener con ello una certeza a nivel geométrico de la repetibilidad de las experiencias, y segundo, para detallar el cómo se comporta el material durante el adelgazamiento conforme el punzón estira el metal. Las siguientes imágenes nos muestran la realidad física de la pieza posterior a la prueba.

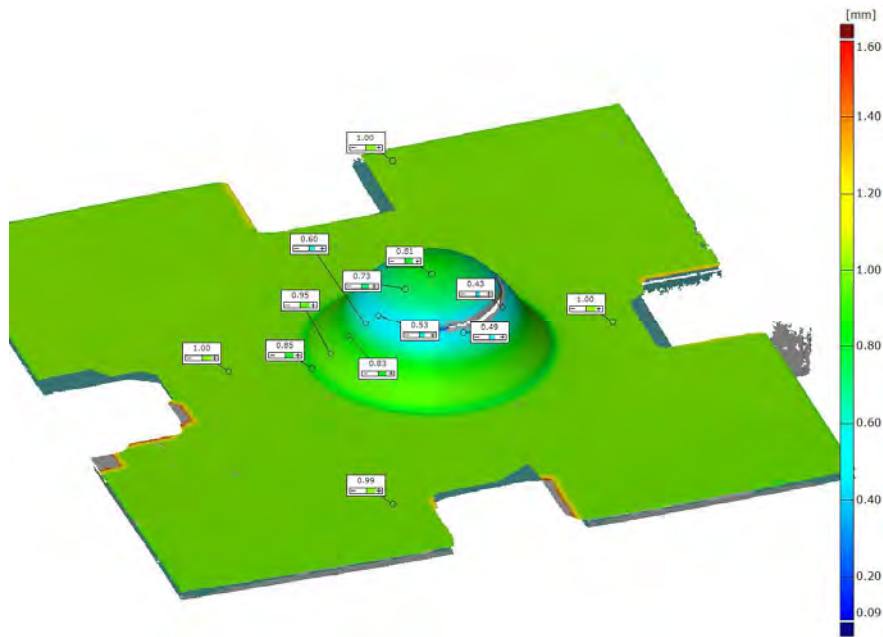


Fig. 5.2. Distribución de espesores en la lámina de acero calibre 18

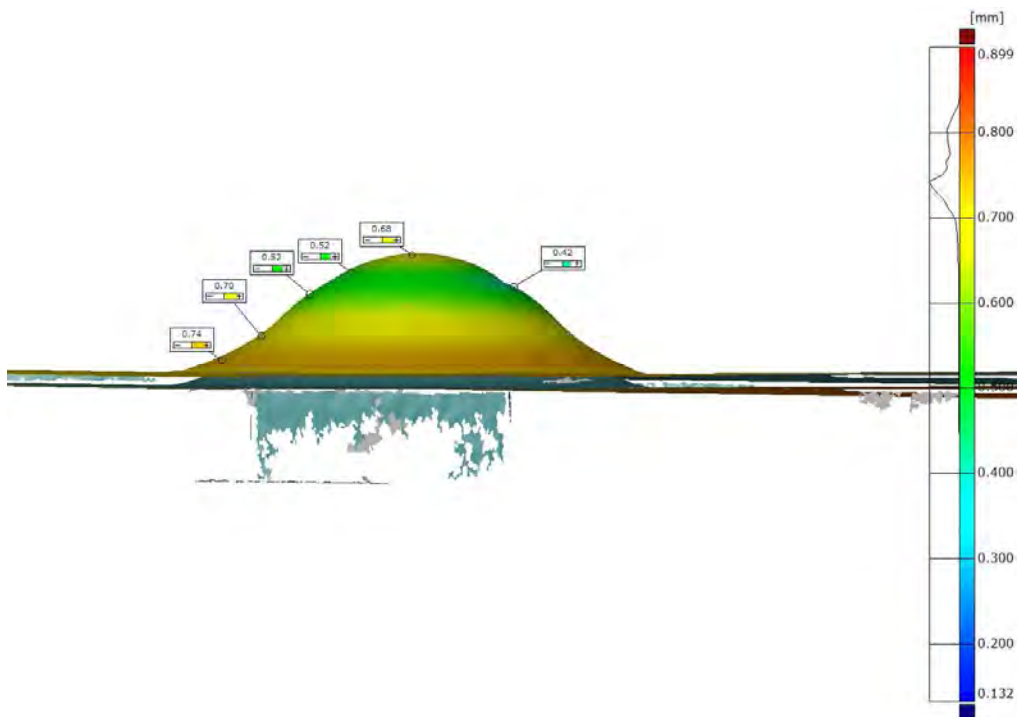


Fig. 5.3 Distribución de espesores en la lámina de cobre de 0.75 mm de espesor

Nótese como el espesor no varía de manera completamente constante al formado de la copa, sino que se producen zonas claramente definidas en las que el

adelgazamiento sí es constante (zona amarilla) y existe un abrupto cambio en donde aparece la ruptura (zona verde).

En lo que toca a la comparativa entre las simulaciones de elemento finito y los resultados físicos conviene hacer una pausa para establecer algunos parámetros de análisis. El elemento finito es una herramienta que aproxima más a la realidad las simulaciones en tanto se tenga mayor conocimiento de las condiciones reales de cualquier experimento, esto es, conocer las propiedades mecánicas de las muestras a través de la vía experimental y no tanto por la vía enciclopédicas. En la simulación que se realizó en el capítulo IV se supusieron propiedades genéricas de los materiales, cobre laminado y acero 1018 laminado, ambos en frío. A pesar de no ser los datos más precisos se obtuvieron resultados congruentes y cercanos a lo reportado por las gráficas de fuerza versus desplazamiento del punzón.

Hablar de resultados congruentes implica el hecho de analizar los resultados con criterio y no solamente a partir de una mera comparación numérica. Tanto en las imágenes obtenidas mediante digitalización como de las simulaciones de elemento finito notamos que existe un 'cinturón' de deformación, justo en esa parte de la geometría coinciden las simulaciones con el cálculo numérico del promedio de los esfuerzos, es decir, en las zonas donde el material se deforma a un espesor relativamente constante el elemento finito marca que es precisamente en dichas zonas donde se presenta el promedio de los esfuerzos. El promedio de los esfuerzos consiste únicamente en hacer una proyección del área de acción del punzón sobre la lámina a estirar y aplicar la fórmula clásica de fuerza entre área.

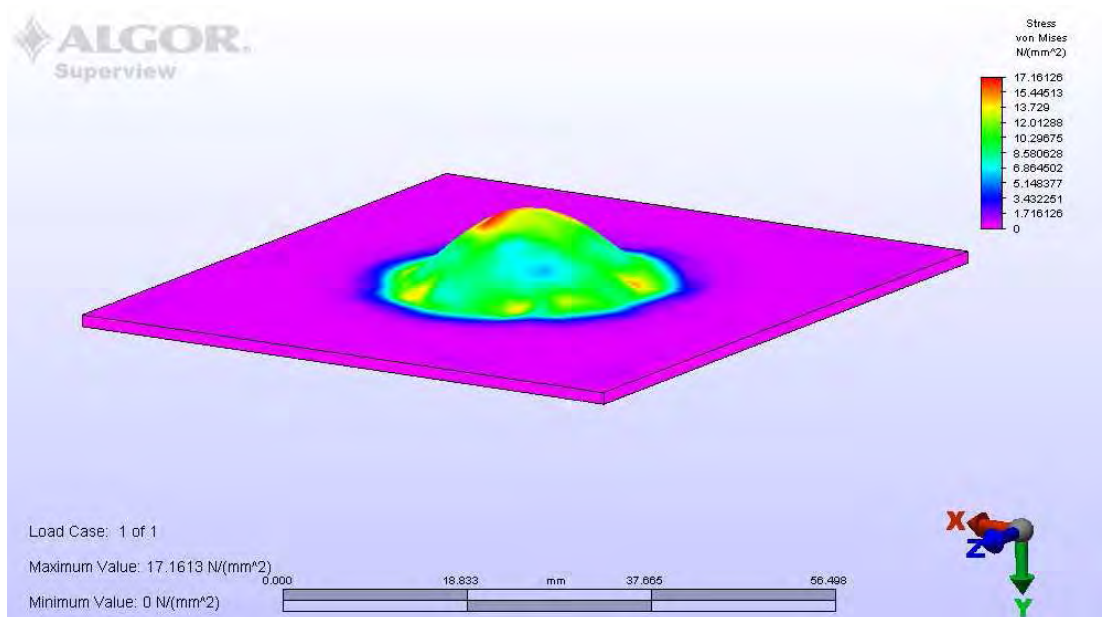


Fig. 5.4. Mapa de colores de los esfuerzos resultantes en la lámina de acero calibre 18.

El promedio experimental de los esfuerzos para el acero calibre 1018 resultó ser de 11.73 MPa. En ALGOR, los esfuerzos promedio resultaron ser de 11.15 MPa, esto es, un 95% de similitud entre lo reportado por la máquina de pruebas y lo calculado por elemento finito. En términos generales el promedio de coincidencia entre ALGOR y la máquina de pruebas para todos los ensayos que se realizaron fue del 93.2%, lo cual, nos permite concluir que la simulación virtual del proceso tiene un carácter válido como mecanismo de análisis en nuestra investigación, no está por demás decir que la similitud lograda en gran medida se debe a que el experimento como tal no involucra grandes deformaciones en la pieza, es una operación de formado sencilla.

Finalmente, cabe señalar que elemento finito en su mapa de colores muestra claramente su condición de herramienta teórica, la zona de ruptura la calcula exactamente en la parte más alta de la copa.

Otro punto que no debe quedar sin analizar es la repetibilidad de los experimentos. Nuevamente recurrimos a la inspección por digitalización para hacer una comparativa física de las muestras y no basarnos únicamente en los resultados de la máquina de pruebas. En este punto lo fundamental es conocer qué tan fiable es la gráfica obtenida en la máquina de pruebas para saber si en verdad el

desplazamiento del punzón reportado por la máquina es el que físicamente se ve reflejado en la altura de las copas. Asimismo, es importante saber qué semejanza existe entre un experimento y otro, lo cual es un factor que depende íntegramente de la habilidad del operador de la prensa para detener la prueba justo en el instante en que se presente la caída de carga. Recordando un poco las alturas de las copas reportadas en el capítulo IV:

Material	Altura de la copa (mm)
Acero calibre 18	10.903 +/- 0.3
Acero calibre 22	8.89 +/- 0.25
Cobre espesor 0.65 mm	6.604 +/- 0.15
Cobre espesor 0.75 mm	7.112 +/- 0.12
Cobre espesor 0.9 mm	7.62 +/- 0.05

El cálculo de la altura física de la copa se hizo a partir de una sección en el archivo digitalizado y se hizo la medición de dicha altura, para el acero calibre 18 el resultado en una lámina fue el siguiente.

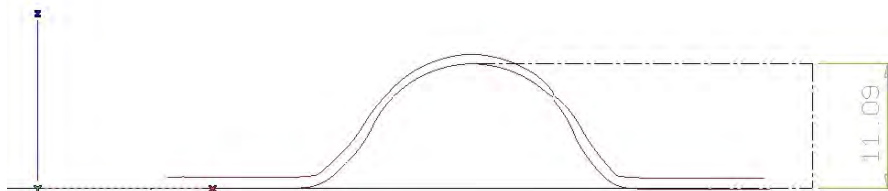


Fig. 5.5. Medición física de la altura de la copa en el acero calibre 18

Haciendo una comparativa con otras digitalizaciones del mismo material, el promedio de las copas en el acero calibre 18 es de 10.955 +/- 0.22 mm, el cuál es 99.52% similar al reportado por la máquina Instron. Para el acero calibre 22, las digitalizaciones marcan una altura promedio de copa de 8.94 +/- 0.12; 99.44% semejante al establecido por máquina. Caso análogo se presenta con el cobre, para el caso de la muestra de espesor de 0.75 mm, la medición de la altura se aprecia en la siguiente imagen 5.6.

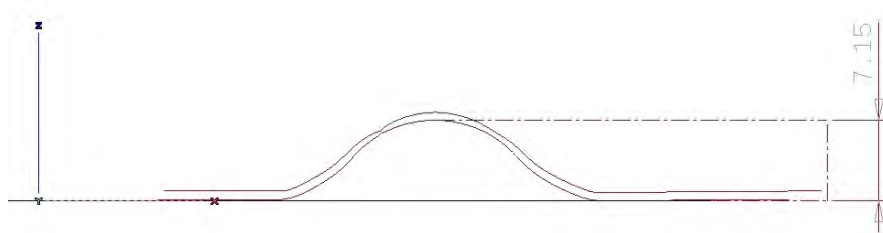


Fig. 5.6. Medición física de la altura de la copa en la muestra de cobre de 0.75 mm

Los resultados y similitudes entre las gráficas generadas por la prensa y la medición directa en las digitalizaciones de cobre son superiores al 98%. Para el cobre de 0.75 mm de espesor la digitalización indica una altura promedio de  $7.23 \pm 0.14$ , 98.34% semejante a las gráficas de la prensa. Condensando toda la información en una tabla:

Material	Altura de la copa reportado por m(mm)	Altura de la copa medida por digitalización (mm)	% de semejanza
Acero calibre 18	$10.903 \pm 0.3$	$10.955 \pm 0.22$	99.77
Acero calibre 22	$8.89 \pm 0.25$	$8.94 \pm 0.12$	99.44
Cobre espesor 0.65 mm	$6.604 \pm 0.15$	$6.71 \pm 0.18$	98.39
Cobre espesor 0.75 mm	$7.112 \pm 0.12$	$7.23 \pm 0.14$	98.34
Cobre espesor 0.9 mm	$7.62 \pm 0.05$	$7.54 \pm 0.2$	98.95

Con un porcentaje superior al 98%, se puede concluir que la máquina de pruebas y las gráficas que genera son confiables al ser confrontadas con resultados físicos.

A nivel virtual, los resultados de la anterior tabla se pueden generar mediante un empalme de las digitalizaciones y, con un post procesamiento conocido como 'best fit', el software de inspección calcula el mejor ajuste entre piezas para generar un modelo de coincidencias expresado mediante un mapa de colores que permite distinguir de manera continua y discreta (con puntos específicos) la semejanza entre las copas formadas en el ensayo.

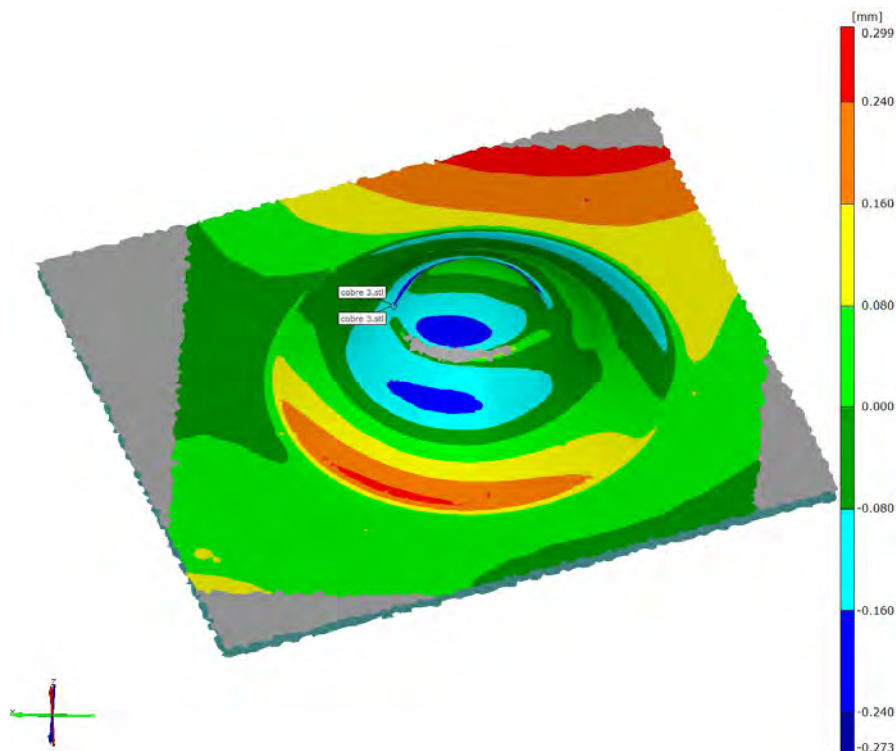


Fig. 5.7. 'Best fit' entre la digitalización de la lámina de cobre de 0.9 mm de espesor

Concluiremos este trabajo haciendo mención a algo que ya se hizo notar al principio de esta sección, el ensayo Erichsen no es una prueba concluyente ni contundente sobre las capacidades de 'embutibilidad' de la lámina metálica; esta prueba es importante porque permite forjar un criterio de producción basado en un experimento rápido. La parte más importante del ensayo Erichsen y bajo la cual se permite establecer que es una prueba útil consiste en realizar todos los ensayos bajo las mismas condiciones de sujeción, avance de punzón y de todas aquellas variables que se establezcan en la norma elegida como estándar, ya que bajo la repetibilidad de las condiciones se pueden generar curvas que adquirirán gran valor para la gente que toma decisiones en las áreas de diseño y producción dotando de un conocimiento más sutil sobre la ductilidad de los materiales que les permita predecir e incluso sustituir láminas por otras con espesores más gruesos o más delgados, o de otro proveedor, que permitan tener una producción ininterrumpida, evitando las típicas fallas de desgarramiento, orejeados o arrugados sobre todo en piezas complejas o en aquellas que sean de un corte funcional – estético como carrocerías.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASM Handbook. Volume 14: Forming and Forging. Ed. International Handbook Committee, EUA. 2000.
2. ASTM E643 - 09 Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material.
3. Avitzur, Betzalel. Metal Forming: Process and analysis. Ed. McGraw-Hill, E.U.A. 1968.
4. Avner, Sydney. Introduction to Physical Metallurgy. McGraw-Hill. México 1974.
5. Chaker. Akrouf. Numerical and experimental study of the Erichsen Test for metal stamping. APEM Journal. Francia, 2008.
6. Dieter, George. Mechanical Metallurgy. Ed. McGraw-Hill, E.U.A. 1970.
7. Faires, Virgil. Diseño de Elementos de Máquinas. Ed. Limusa. México 2003.
8. Groover, Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. Ed. McGraw-Hill. México 2007.
9. Rossi, Mario. Estampado en Frío de la Chapa. Publicaciones de la Universidad de Santiago de Chile – Facultad de Ingeniería. Chile 2009.
10. Schey, John. Procesos de Manufactura. Ed. McGraw-Hill. México 2000.