



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: *CONFORMADO INCREMENTAL APLICADO AL DISEÑO Y
DESARROLLO DE PROTOTIPOS***

**AUTOR:
PÉREZ AGUILAR, MICHELLE ESTEFANÍA**

**DIRECTOR DE TESIS: ING. LUIS SEGURA
DESIGNADO POR LA CARRERA: ING. JOSÉ PÉREZ
DESIGNADO POR EL DEPARTAMENTO: ING. BORYS CULQUI**

SECRETARIO ACADEMICO: Dr. MARCELO MEJIA

OBJETIVO GENERAL

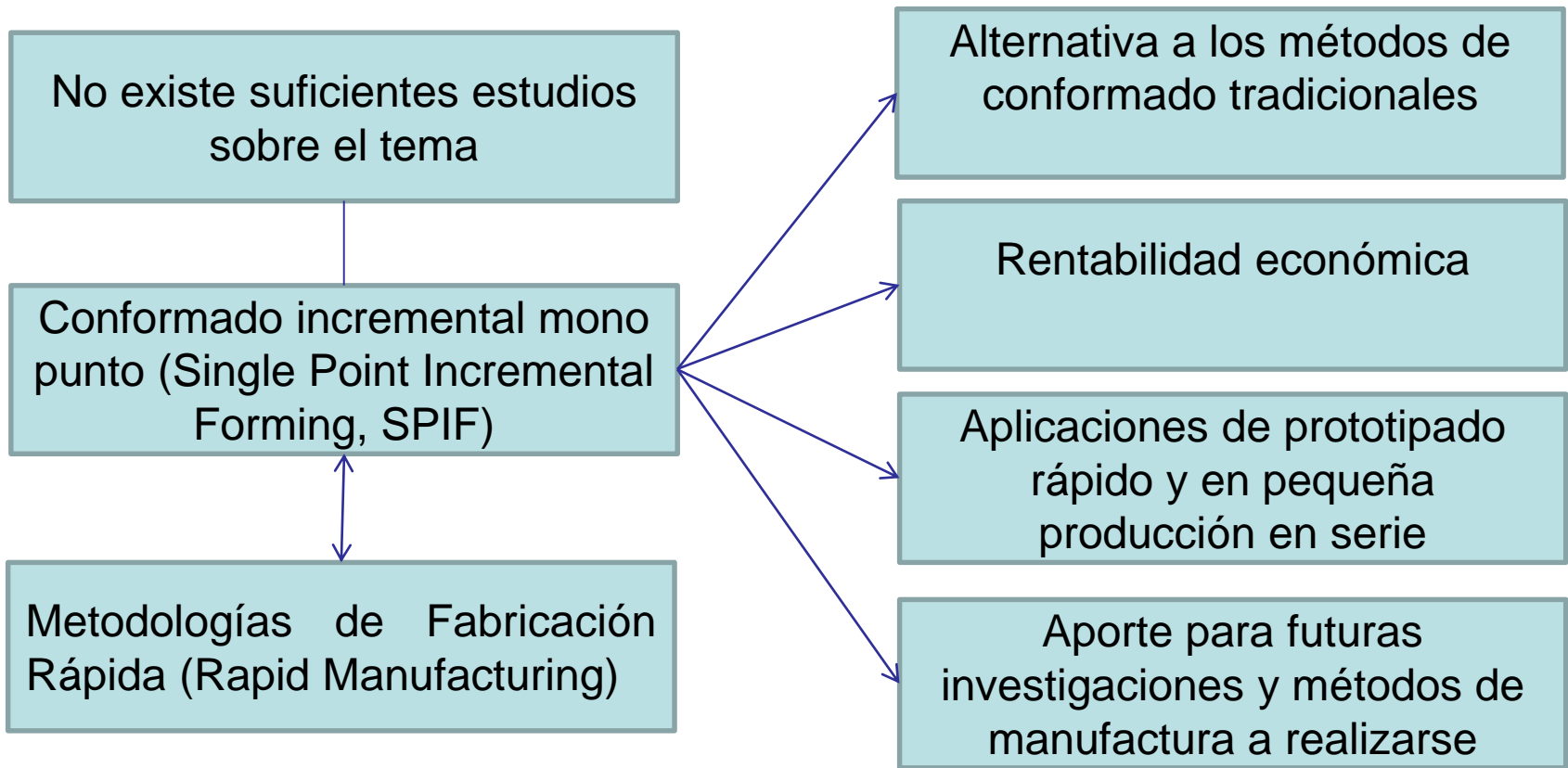
Diseñar y Desarrollar dos prototipos usando el proceso de conformado incremental.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las principales características del proceso de conformado incremental mono punto SPIF, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones.
- Diseñar y seleccionar las herramientas y utillajes necesarios para la aplicación del proceso de conformado incremental mono punto SPIF sobre la chapa para obtener los prototipos seleccionados.
- Seleccionar y construir dos prototipos aplicando la tecnología de conformado incremental mono punto (SPIF).
- Determinar los parámetros más influyentes y comunes dentro del proceso de conformado incremental mono punto que tienen repercusión en la geometría y dimensiones finales de los prototipos seleccionados, teniendo como premisa la utilización del equipo CNC FADAL VCM 3016 del laboratorio de la ESPE.
- Analizar experimental y visualmente la conformabilidad sobre chapas metálicas de aluminio en dos prototipos utilizando el proceso de conformado incremental mono punto.
- Emitir conclusiones sobre el estudio y análisis experimental realizado sobre el proceso de conformado incremental mono punto (SPIF).



Antecedentes, Justificación e Importancia



ALCANCE DEL PROYECTO

Estudio del proceso de conformado incremental
monopunto

Evaluar experimentalmente el conformado
incremental monopunto

Diseño, selección y construcción del herramental y
utillaje necesarios para esta técnica

Selección y diseño de los prototipos mediante
técnicas CAD/CAM.

Fabricación de los prototipos mediante
conformado incremental mono punto.

Análisis de Resultados, conclusiones y
recomendaciones.

Dejar un precedente para posteriormente lograr
introducir este tipo de tecnología en la industria en un
futuro no muy lejano



MARCO TEÓRICO

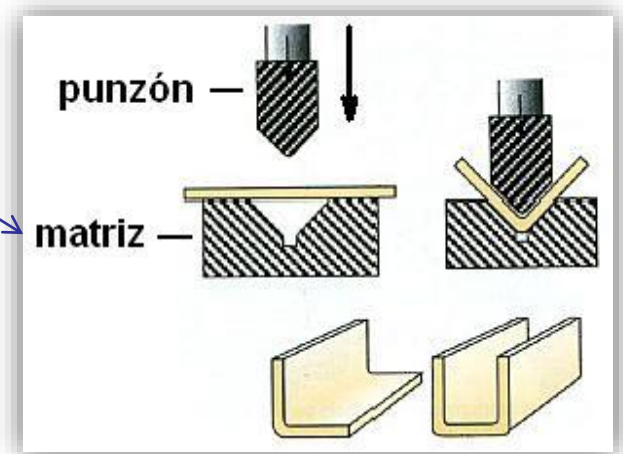


E S P E
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

Procesos de formación de chapa metálica

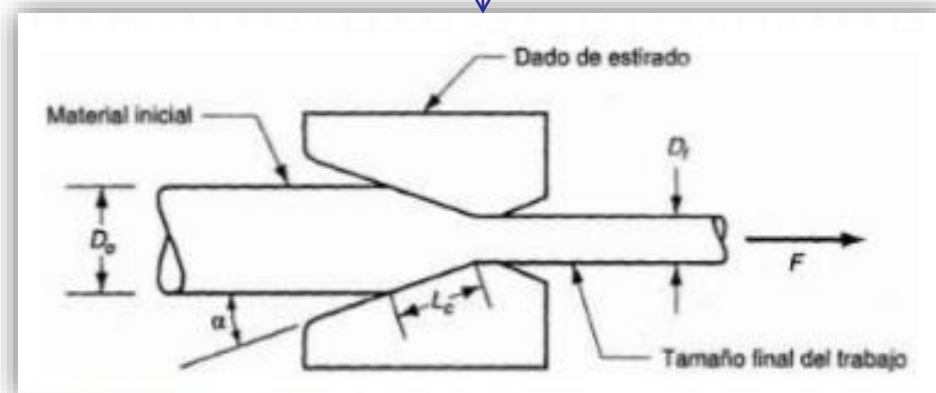
Plegado o doblado

Consiste en doblar una chapa



Estirado

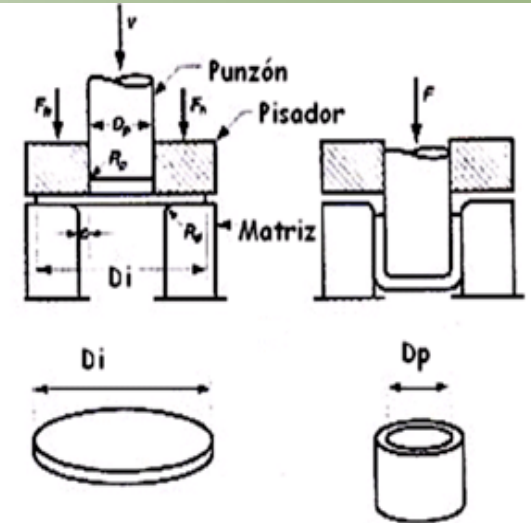
Estira una barra o varilla de metal con el objetivo de reducir su sección



Procesos de formación de chapa metálica

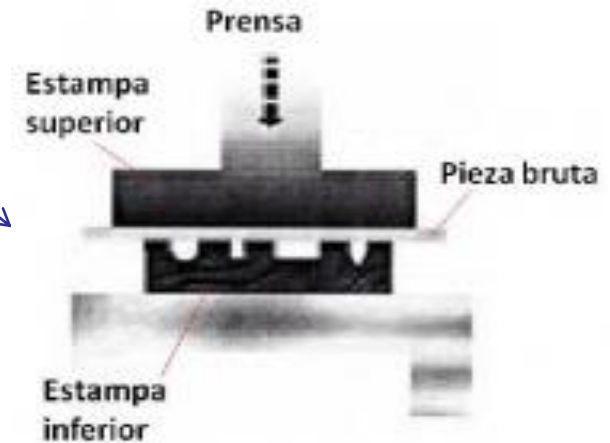
Embutición

Deformar de forma que la mayor deformación se produzca en las paredes de las piezas



Estirado

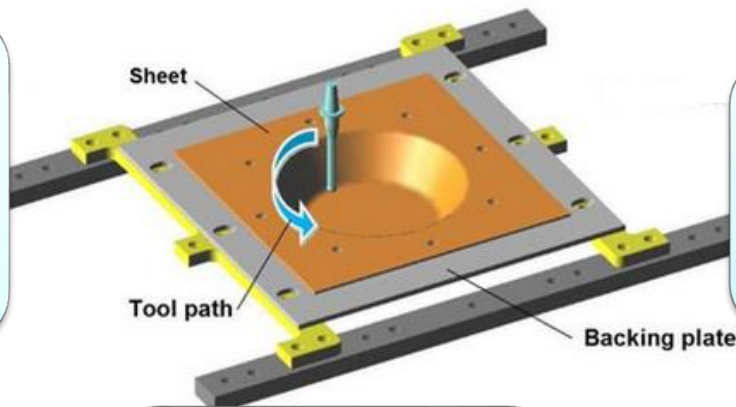
Forjado mecánico con molde o estampa



Conformado Incremental

Proceso derivado de las tecnologías existentes en el área de fabricación rápida

La herramienta sigue un recorrido programado mediante el uso de equipos y técnicas de control numérico.



Permite reducir el coste de herramientas específicas como matrices

Genera sucesivas y pequeñas deformaciones sobre la chapa con una herramienta o punzón semiesférico, hasta que la suma de estas pequeñas deformaciones configure la forma final deseada.

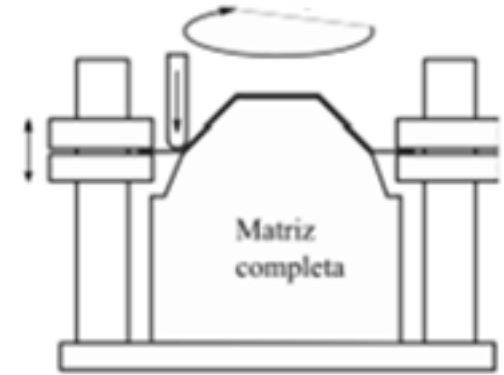
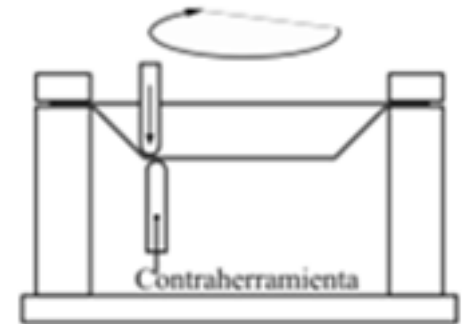


Conformado Incremental

Las dos configuraciones más comunes son:

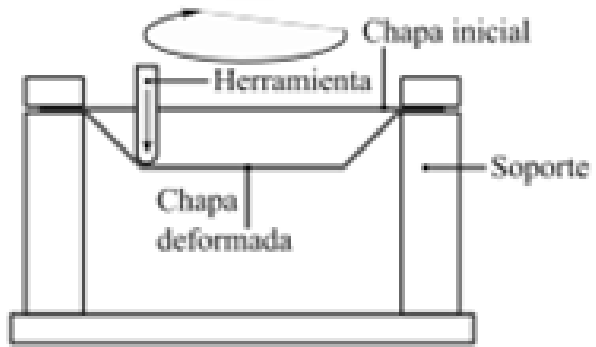
- **El Two-Point Incremental Forming (TPIF):** es un proceso en el que la placa es presionada simultáneamente por dos puntos. El otro punto es otra herramienta o un elemento estático que es considerado un molde parcial, o completo que crea una fuerza contraria hacia arriba en la chapa.
- **El Single-Point incremental Forming (SPIF):** presenta como principal diferencia al proceso anterior la ausencia de molde. En este proceso, la chapa es conformada con una herramienta.

TPIF

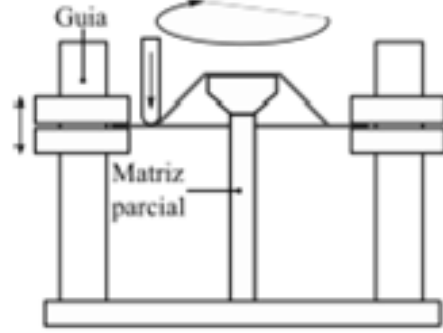


TPIF

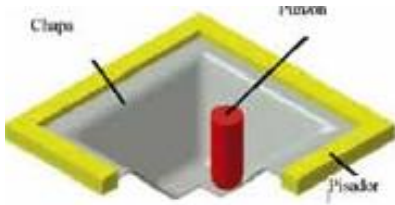
SPIF



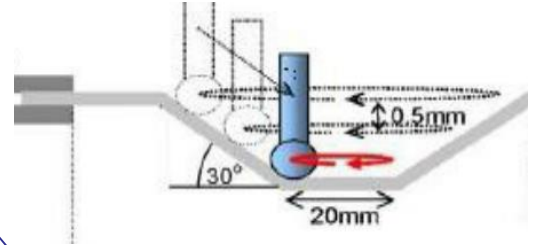
TPIF



Conformado Incremental Monopunto (SPIF)

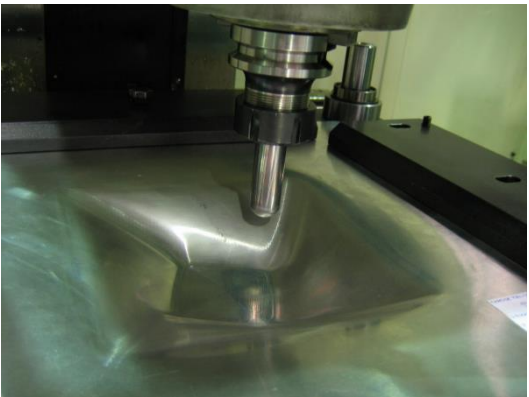


Proceso consiste en deformar la chapa mediante una herramienta con forma esférica o semiesférica

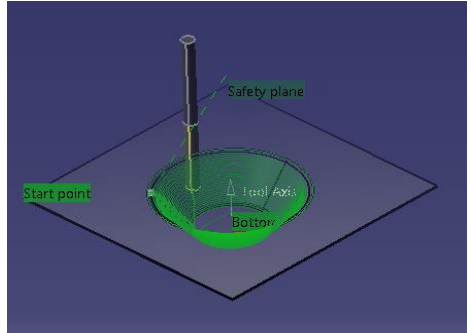


La chapa es deformada plásticamente solo alrededor del área de contacto

La herramienta sigue las trayectorias programadas previamente por un software CAM



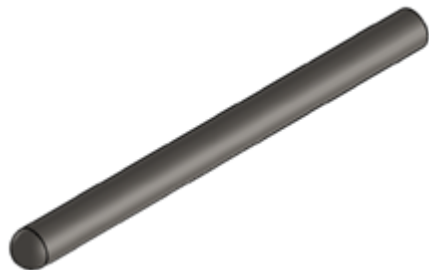
El conformado se realiza de manera local con la cabeza de la herramienta en contacto con la chapa



Conformado Incremental Monopunto (SPIF)

Herramienta

- Elemento principal
- Herramienta sólida de punta hemisférica
- No se venden comercialmente
- Diámetros de los 6 a 100mm



Soporte Rígido

- Necesario para sujetar los extremos de la chapa firmemente
- Evita los movimientos relativos.
- Es una plataforma que sujeta la chapa.



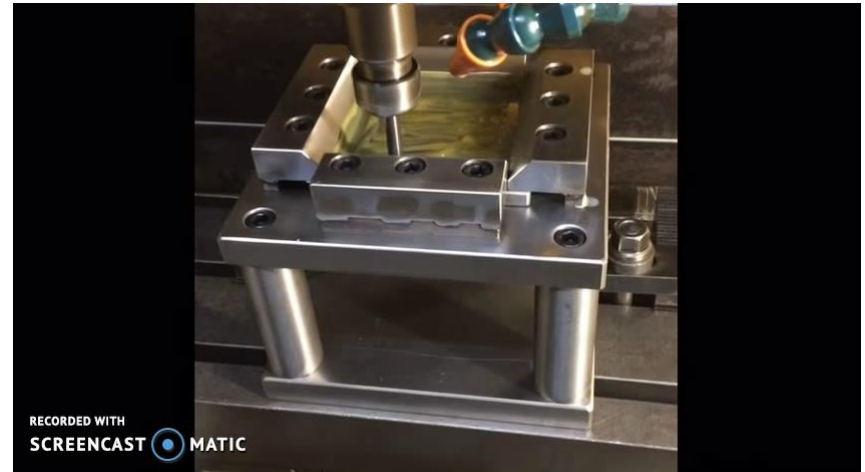
Máquina

- Todas las máquinas CNC de tres ejes o más son adecuadas
- Las máquinas de fresado CNC son las más comunes
- Solo fabricante produce una máquina especialmente diseñada para este propósito



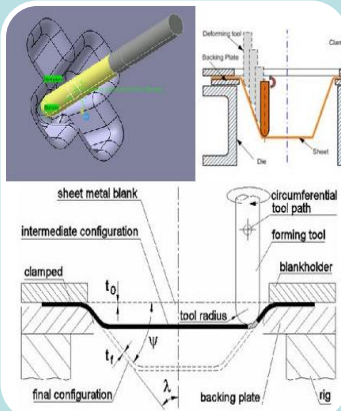
Conformado Incremental Monopunto (SPIF)

- Producción de modelo de piezas directamente desde un archivo CAD y luego a un software CAM
- No hay necesidad de una matriz positiva o negativa
- Los cambios de diseño pueden ser fácil y rápidamente realizados
- Aumento de la capacidad de conformación material
- Se puede realizar en una máquina convencional de control numérico computarizado CNC
- Debido a la naturaleza incremental del proceso, las fuerzas son pequeñas.
- Las dimensiones de las partes sólo están limitadas por la máquina herramienta.
- Tiempo más largo de procesamiento en comparación con la embutición profunda convencional.
- Se limita a pequeños lotes de tamaño de producción.
- La formación de ángulos rectos debe ser alcanzada por estrategias de varias fases.
- Geometría de menos precisión, en particular en los radios de flexión convexa y bordes



Conformado Incremental Monopunto (SPIF)

Parámetros importantes de formación en el SPIF



- Trayectoria de la herramienta
- Material de la hoja
- Ángulo de formación
- Tamaño de la herramienta
- Tamaño del paso
- Velocidades de conformación
- Geometría del prototipo

Aplicaciones del proceso de conformado incremental



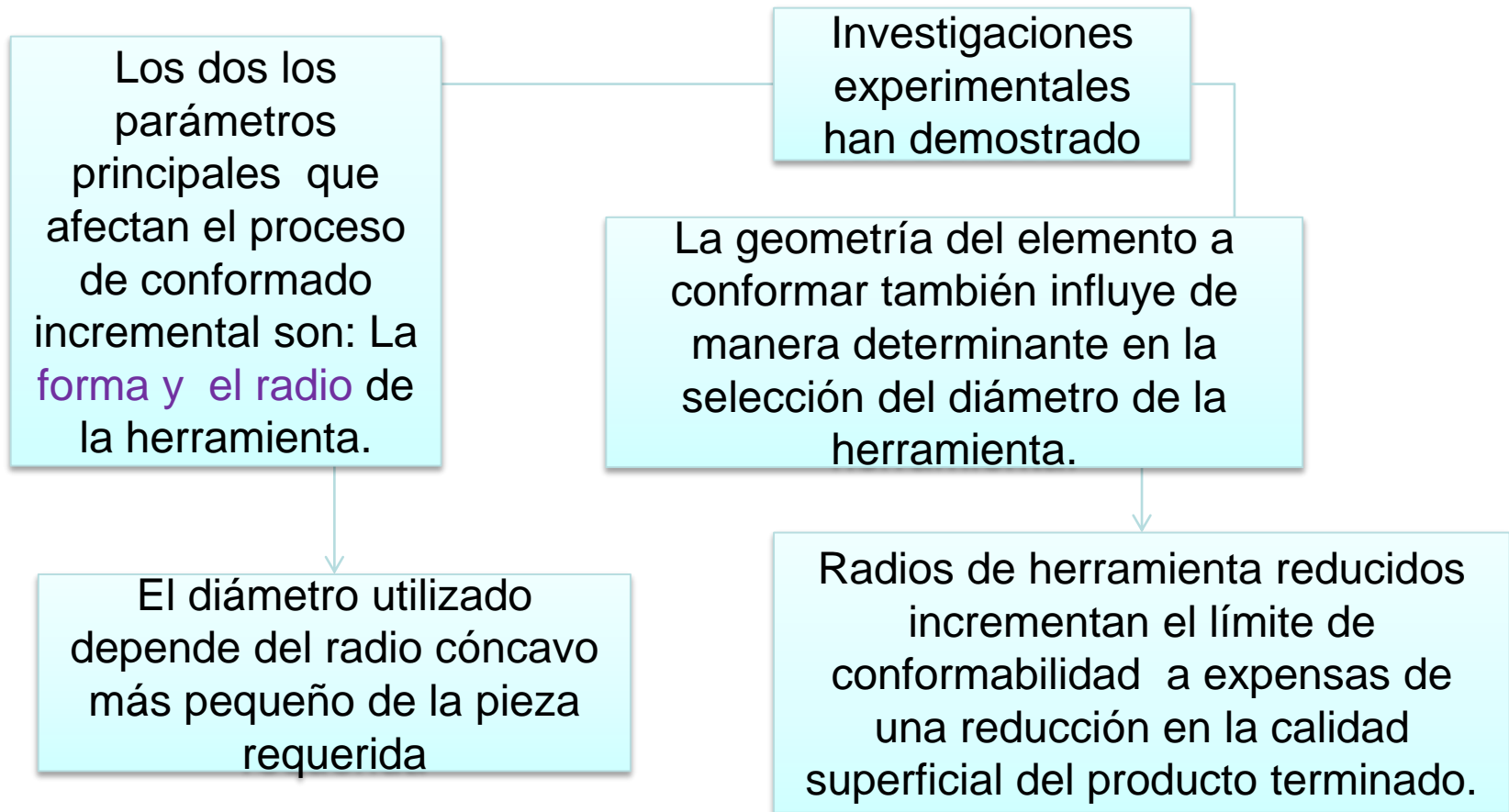
- Prototipado rápido para la industria automovilística
- Asientos de motocicletas
- Tanques de gasolina
- Moldes para producción de superficies
- Se está empezando a estudiar la aplicación del proceso para la creación de prótesis médicas.
- Piezas y componentes para la industria aeronáutica

DISEÑO DE HERRAMIENTA DE CONFORMADO Y UTILLAJE RIGIDO



HERRAMIENTA DE CONFORMADO

Consideraciones geométricas



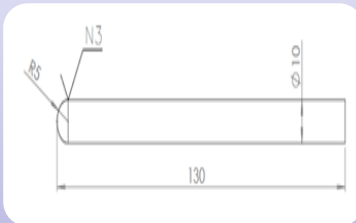
HERRAMIENTA DE CONFORMADO

Tipo de punta Semiesférica



- Contacto más uniforme y permanente con la superficie de la chapa metálica.
- Relativamente sencillo de maquinar.
- Los resultados experimentales utilizados para fundamentar el diseño de la herramienta han sido obtenidos empleando herramientas de punta semiesférica.

Medidas de la herramienta



- Diámetro de herramienta de 10mm
- Largo de la herramienta: 130 mm divididos en 70 mm para sujetar fijamente la herramienta con el portaherramientas, 30 mm más para cerciorarse de que la herramienta no choque con el soporte, más 30mm de la profundidad máxima de las piezas.

Consideraciones dinámicas

Durante el proceso de conformado incremental, la herramienta se encuentra expuesta a fuerzas en los tres ejes cartesianos.

- Plano X,Y = Plano de la chapa metálica a conformar.
- Eje Z Positivo = A lo largo de la herramienta de conformado.

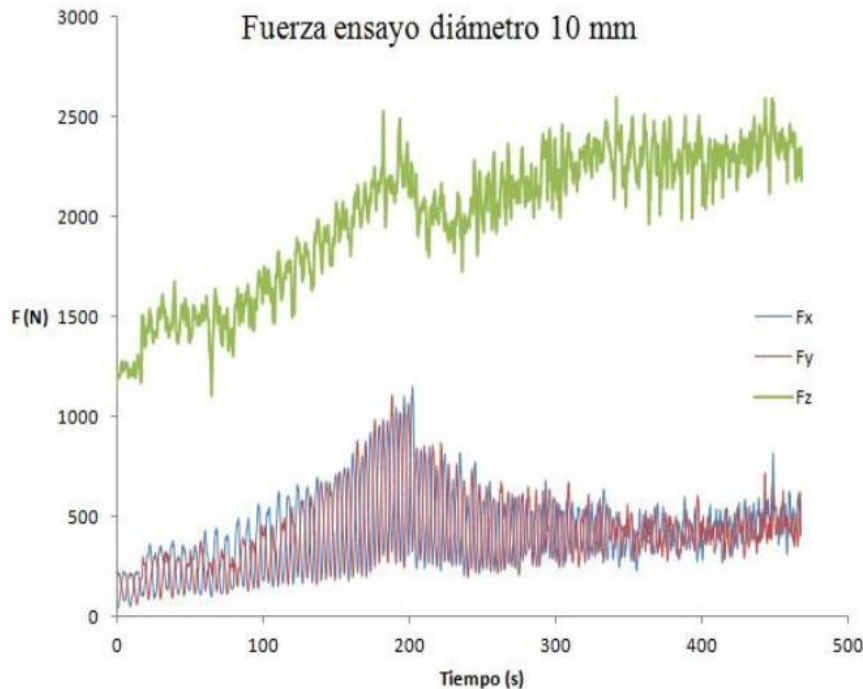
El proceso de conformado incremental es una tecnología relativamente nueva, actualmente no existen modelos matemáticos estandarizados, más allá de algunas propuestas generadas a base de procedimientos experimentales.

HERRAMIENTA DE CONFORMADO

Referencia: Trabajo realizado en la universidad de Sevilla en 2014 por Francisco J Ruiz titulado *Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio*.

Medición de fuerzas sobre la herramienta en condiciones muy similares a las planteadas en el presente trabajo:

- Material a conformar: Chapa AL 7075-O de $e=1,6$ mm
- Diámetro de la herramienta: 10 mm & 20 mm
- Material de la herramienta: Acero al carbono templado.



Herramienta de 10 mm de diámetro

La mayor carga a la que se somete a la herramienta es la vertical, llegando a un valor máximo que ronda los **2500 N**.

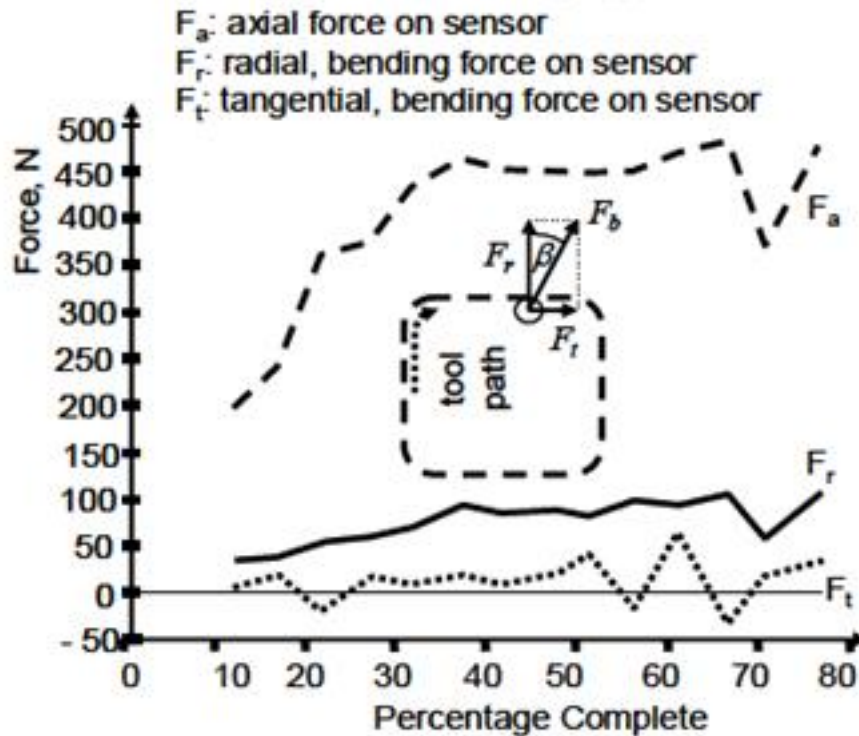
La fuerza necesaria para conformar la chapa aumenta conforme se avanza en el proceso, a mayores ángulos de inclinación de la pared la carga necesaria es mayor

HERRAMIENTA DE CONFORMADO

Referencia: Trabajo *Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming*, desarrollado por J. Jeswiet, J. R. Duflou y A. Szekeres, pertenecientes a Queen's University en el año 2005.

En este caso el objetivo es caracterizar las fuerzas implicadas en el proceso de conformado de una Chapa de Aluminio AA-3003 de 1,21mm de espesor.

Forces measured in forming a pyramid.

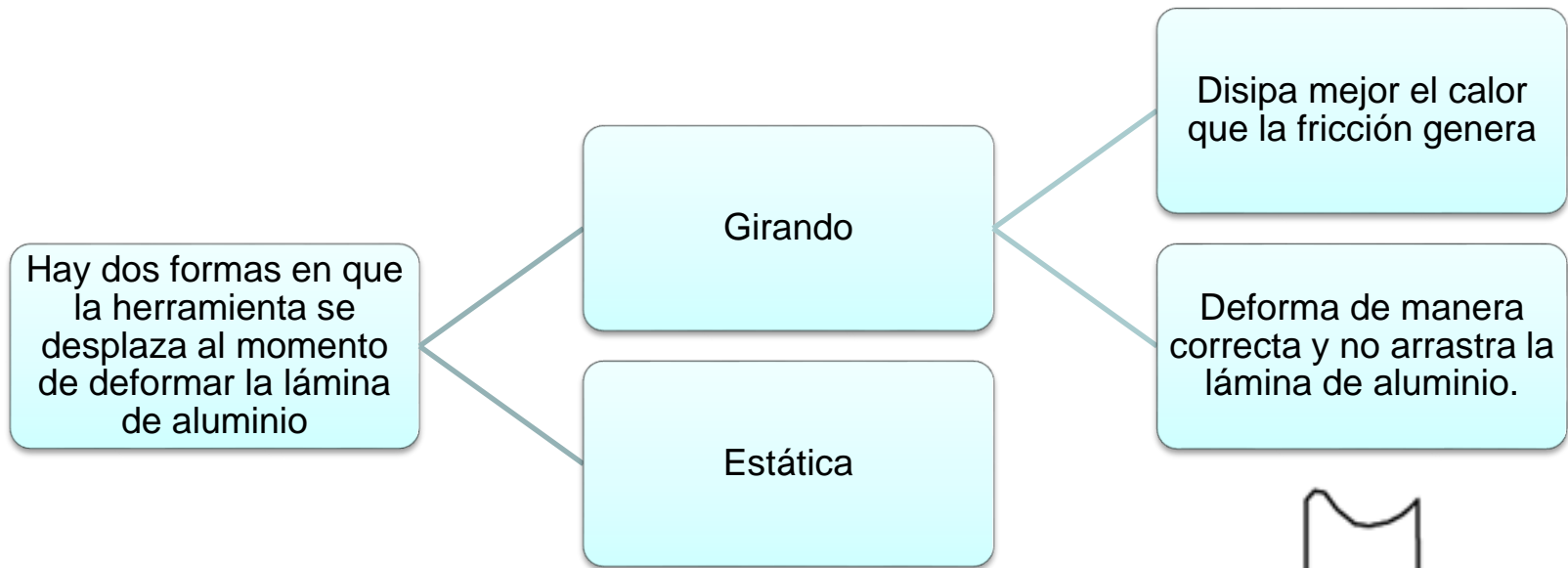


La fuerza máxima es inferior al caso anterior, de **450N**.

aleación de aluminio con un menor grado de resistencia (más maleable), espesor de la chapa a conformar menor.

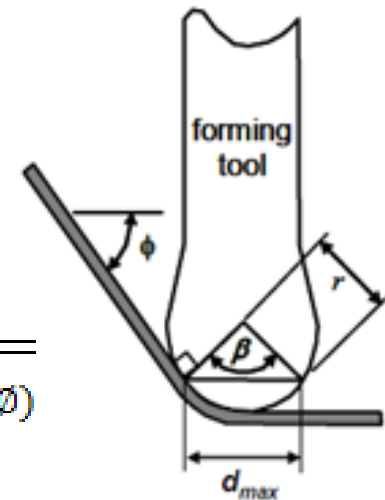
la fuerza en el eje longitudinal de la herramientas es mucho mayor (aproximadamente 2,75 veces) que las fuerzas tangenciales (en los planos X,Y), por lo tanto, esta es la principal carga a ser considerada durante el proceso de diseño.

Giro de la herramienta



Si la herramienta gira a una velocidad demasiado excesiva se desliza por la superficie de trabajo y en vez de disipar el calor se generara un calentamiento excesivo.

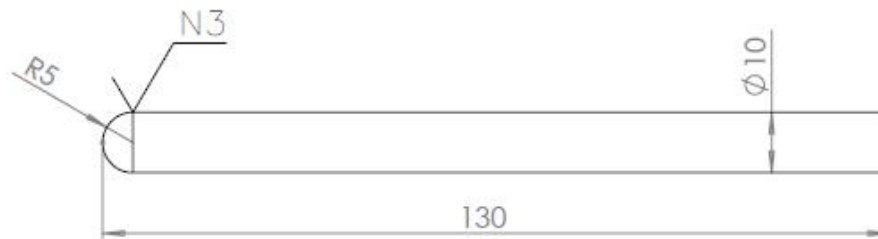
$$\omega = \frac{v}{\pi r \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\phi)}}$$



Dimensionamiento final de la herramienta

Características de la Herramienta para SPIF

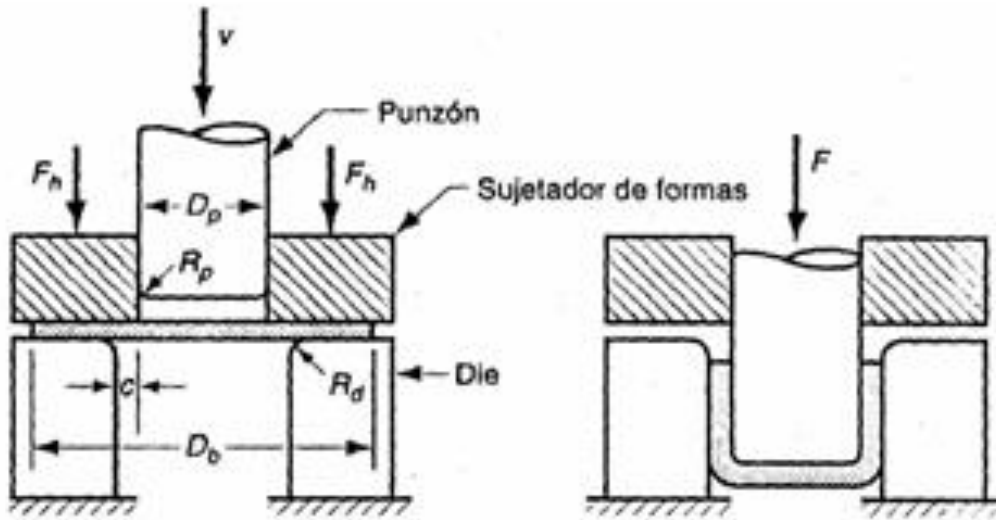
Material:	Acero Alta Resistencia 41L40		
Longitud:	130 mm	Diámetro:	10 mm (punta semiesférica)
Dureza HB:	241	Rugosidad:	N3



SOPORTE O UTILLAJE RÍGIDO (BLANKHOLDER)

Homologación del proceso de embutido con el conformado incremental

Embutido al aire, es la que más se asemeja al proceso de conformado incremental.



C: claro.

D_p : diámetro del punzón.

D_b : diámetro de la forma inicial.

R_d : radio de la placa de soporte.

R_p : radio de la esquina del punzón.

F: fuerza de embutido.

F_h : fuerza de sujeción.

F_h : carga debe sostener el blankholder

SOPORTE O UTILLAJE RÍGIDO (BLANKHOLDER)

Fuerzas aplicadas al sistema de sujeción

Teniendo en cuenta el cálculo anterior de la herramienta donde nos dice que nuestra $F_c = 2500 \text{ N}$ esta "fuerza de corte" será nuestra fuerza de embutido.

$$F_h = c\gamma\pi \left[D_b^2 - (D_p + 2,2t + 2R_d)^2 \right]$$

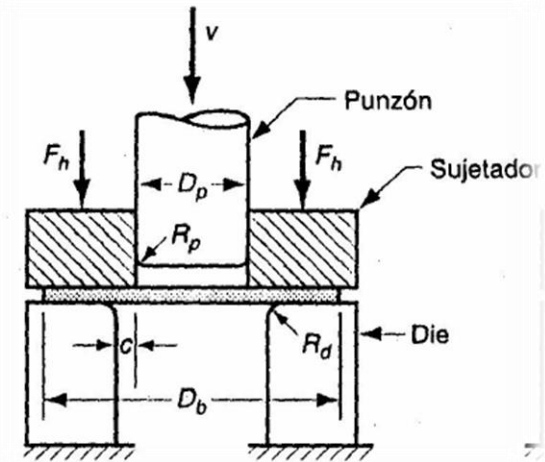
En donde:

- γ : esfuerzo de fluencia de la lámina del metal. (para el caso del aluminio AL-7075-O este valor es de 145 MPa debido al espesor de la lámina.)
- t : espesor de la lámina del metal. (1,0 mm).
- C : factor de iteración. Para nuestro caso utilizaremos un $c=0,0015$

El R_d es despreciable debido a que el radio del borde de la brida inferior es muy pequeño. El D_p para nuestro caso 10mm diámetro de la herramienta. Y el D_b en nuestro caso es 150mm.

$$F_h = 11428,65 \text{ N.}$$

Esta carga F_h tiene que verse distribuida en 8 pernos del soporte.

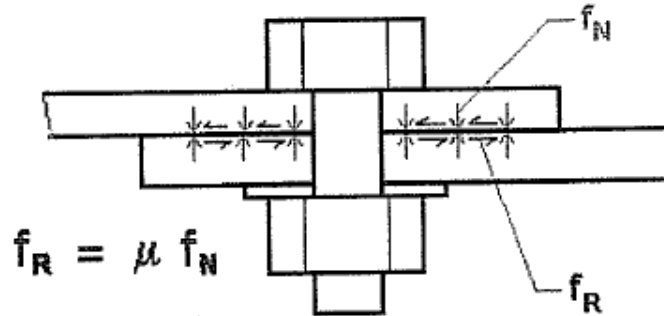


SOPORTE O UTILLAJE RÍGIDO (BLANKHOLDER)

$F_N = F_h$ Para este caso la fuerza normal es la fuerza de sujeción

$$F_R = \mu F_h$$

Donde $\mu=0,33$ debido a la poca rugosidad que existe entre los elementos



$$F_r = 0,33 * \frac{1}{8} 11428,65$$

$$F_r = 471,43 N$$

$$\sigma_z = F_r / A_k$$

$$\sigma_z = \frac{471,43 N}{32,8 mm^2}$$

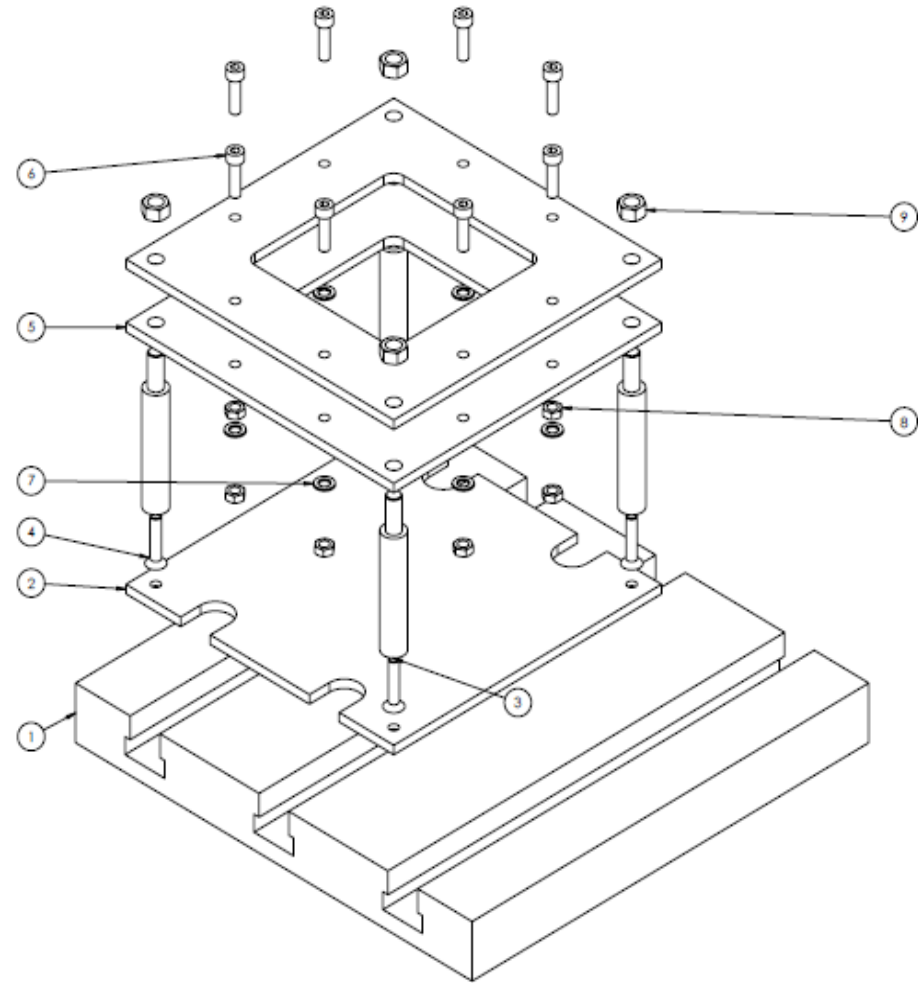
$$\sigma_z = 14,37 \frac{N}{mm^2}$$

Para este caso elegiremos unos pernos M8 con una sección transversal de $32,8 mm^2$, valores en tablas, Decker diseño de elementos de máquinas.

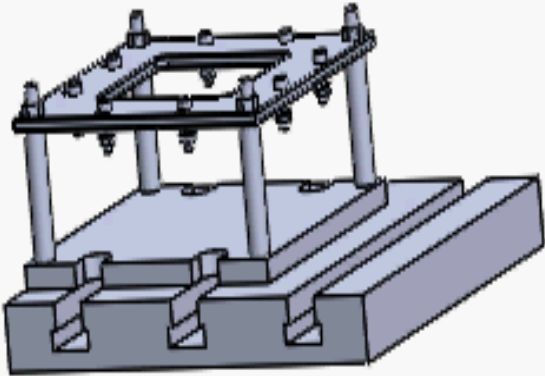


SOPORTE O UTILLAJE RÍGIDO (BLANKHOLDER)

Elementos del sistema de sujeción



Numero	Descripción de la pieza	Cantidad
1	Mesa de trabajo	1
2	Base inferior	1
3	pilar	4
4	Perno avellanado M8	4
5	Brida	2
6	Tornillo de sujeción M8 DIN 7968	8
7	Arandela M8	8
8	Tuerca M8	8
9	Tuerca M 12	2





ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS



E S P E
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

Desarrollo y selección CAD / CAM

Software CAM

- Permite la elaboración del modelo tridimensional mediante la ejecución de la sección Generative Sheet Metal Design, posteriormente, el recorrido de la herramienta de deformación, utilizando la aplicación Advance Machinning y por último, permite la generación del texto de códigos G para la máquina CNC, mediante la método de procesamiento Zlevel

Material

- Para la elaboración de ambos modelos se utiliza aluminio de espesor 1mm, también se toman en cuenta los parámetros de diseño del BlankHolder, el cual cuenta con capacidad de soporte para una lámina de aluminio de 200mm x 200mm, pero el área de trabajo real para realizar la deformación es de 150mm x 150mm.

Prototipos

- Los prototipos a realizar se han seleccionado con geometrías muy básicas y lo más simple posible en vista de que es un trabajo experimental de inicio con el objetivo de que en futuros estudios se realicen trabajos con geometrías más complejas



Prototipo 1

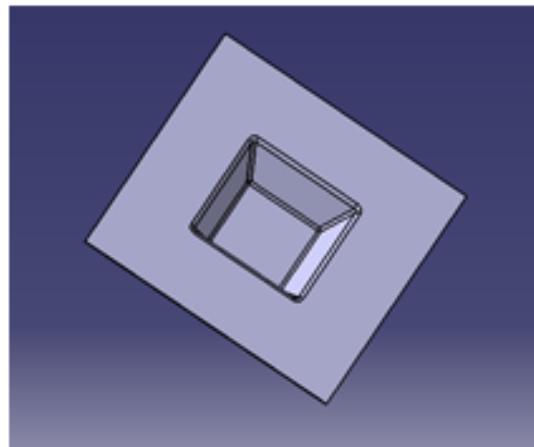
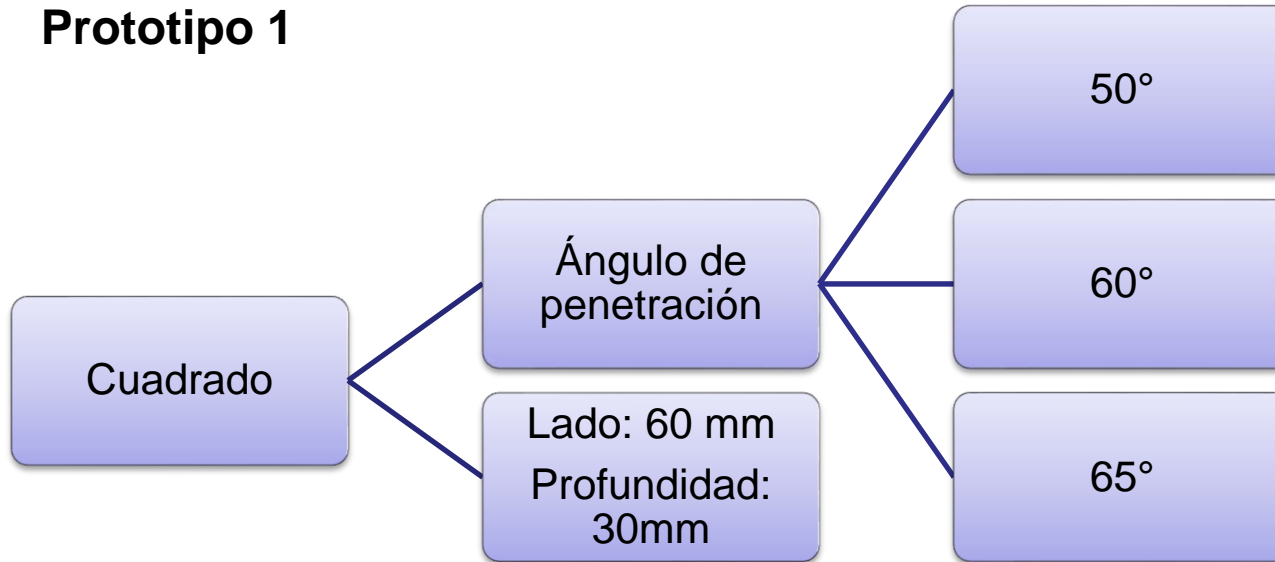


Figura 33: Prototipo 1 de 65°

ProcessList

- Process
 - Part Operation.1
 - Manufacturing Program.1
 - Tool Change.1 T1 End Mill D 10
 - ZLevel.1 (Computed)
 - Tool path

Machining Process List.1

ProductList

ResourcesList

- T1 End Mill D 10

Start point

Z=0.000 Axis

Safety plane

Bottom

Default reference machining axis for Part Op

RECORDED WITH SCREENCAST MATIC

ProcessList

- Process
 - Part Operation.1
 - Manufacturing Program.1
 - Tool Change.1 T1 End Mill D 10
 - ZLevel.1 (Computed)
 - Tool path

Machining Process List.1

ProductList

ResourcesList

- T1 End Mill D 10

Start point

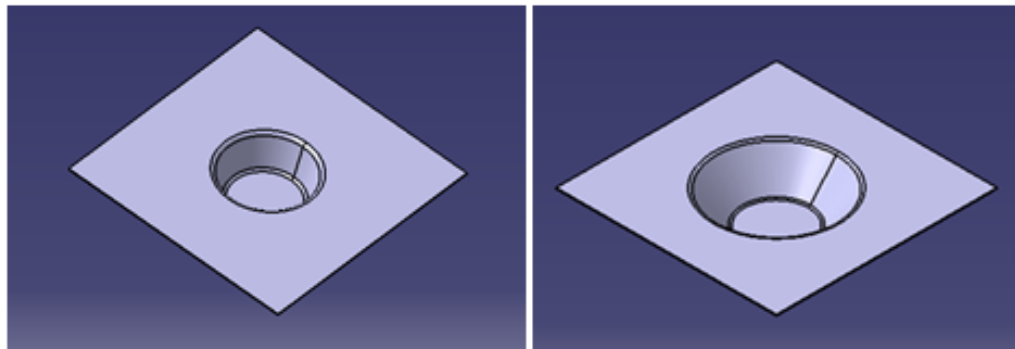
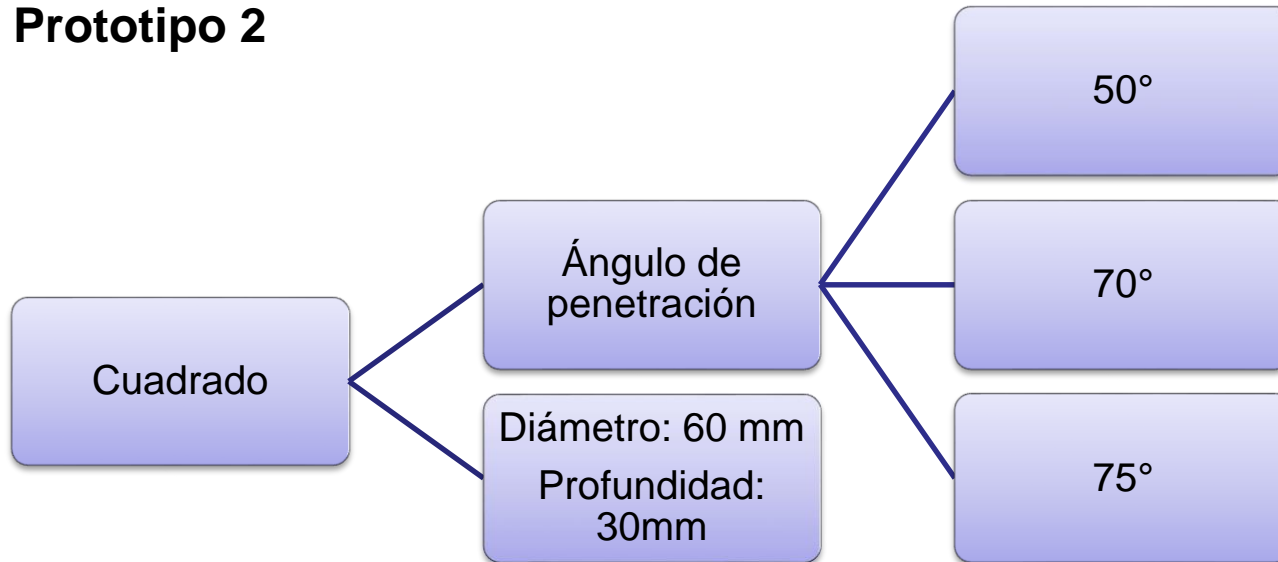
Safety plane

Bottom

Default reference machining axis for Part Op

RECORDED WITH SCREENCAST MATIC

Prototipo 2



a)

b)

Figura 35: Prototipo 2 a) ángulo de 70°, b) ángulo de 50°



ProcessList

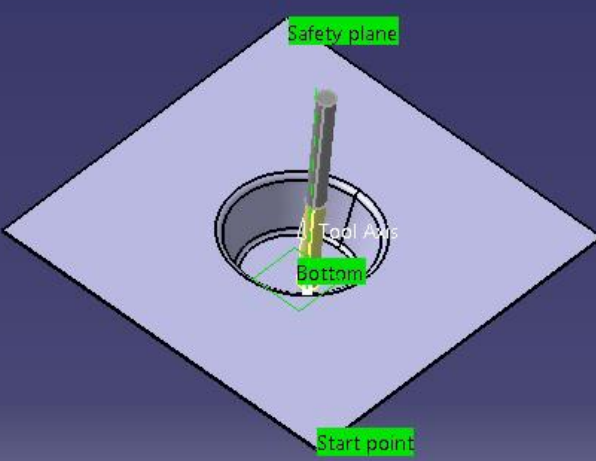
- Process
 - Part Operation.1
 - Manufacturing Program.1
 - Tool Change.1 T1 End Mill D 10
 - ZLevel.1 (Computed)
 - Tool path

Machining Process List.1

ProductList

ResourcesList

- T1 End Mill D 10



RECORDED WITH SCREENCAST MATIC

ProcessList

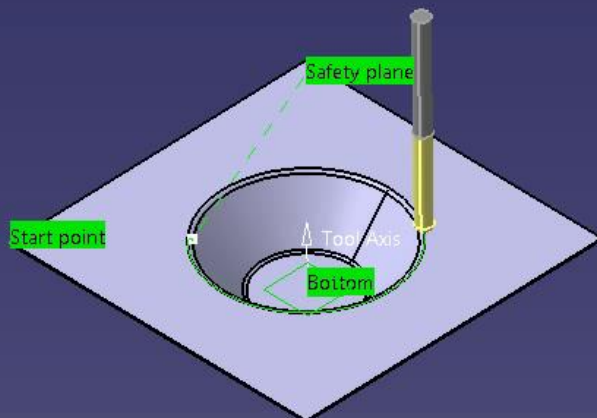
- Process
 - Part Operation.1
 - Manufacturing Program.1
 - Tool Change.1 T1 End Mill D 10
 - ZLevel.1 (Computed)
 - Tool path

Machining Process List.1

ProductList

ResourcesList

- T1 End Mill D 10



RECORDED WITH SCREENCAST MATIC

ENSAYOS EXPERIMENTALES



E S P E
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

Diseño en CAD/CAM



Automatización de equipo CNC a través de los Gcodes generados por el software CAD/ CAM



Proceso de Manufactura en Equipo CNC fresadora FADAL VMC 3016 Conformado Incremental Monopunto de Chapa Metálica



Revisión y control de calidad del producto

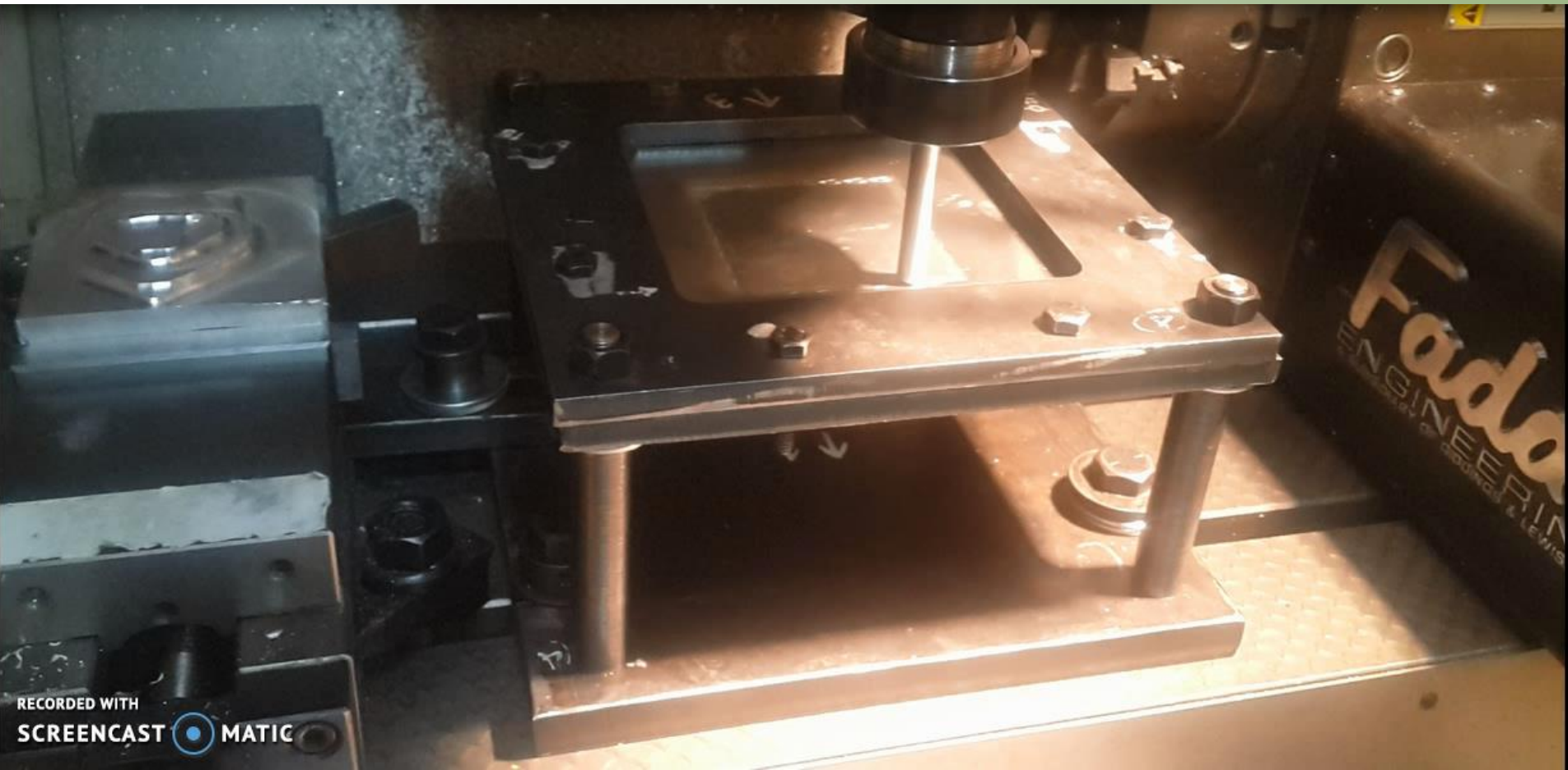




RECORDED WITH
SCREENCAST  MATIC



E S P E
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

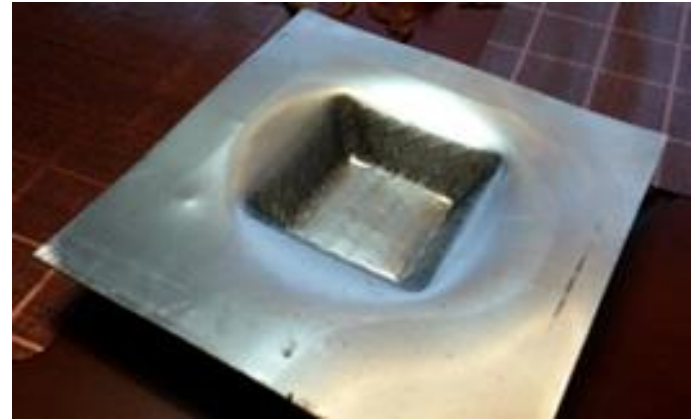
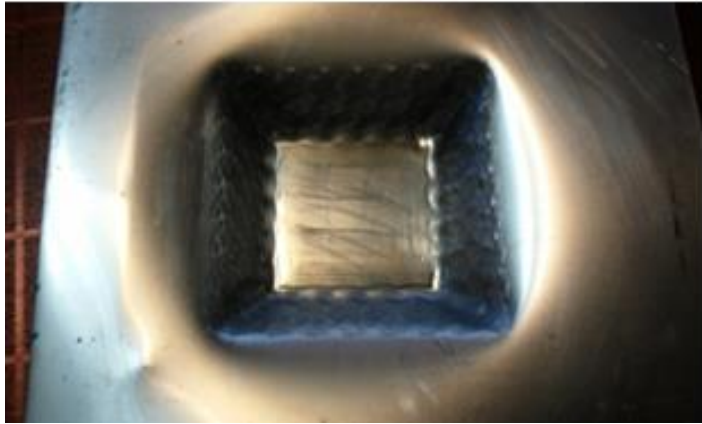


Una vez finalizado el proceso que se estimó dura alrededor de 10 min para cada prototipo, se desmonta el modelo obtenido y se somete a inspección visual y a análisis de resultado obtenido.



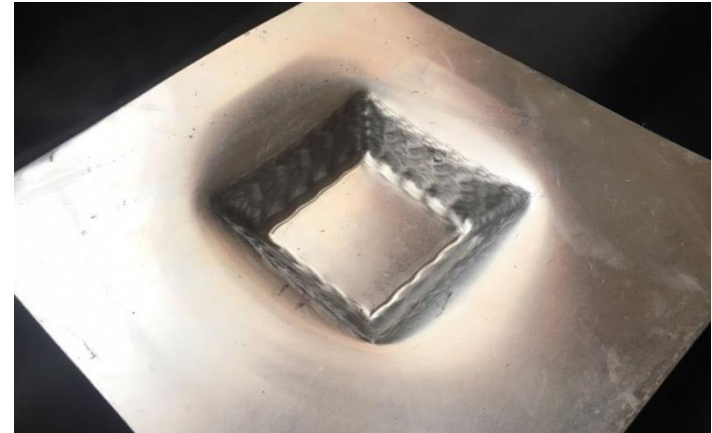
Ensayo 1

Ángulo de penetración: 60°
Profundidad: 28,48 mm
Lado: 58,35 mm



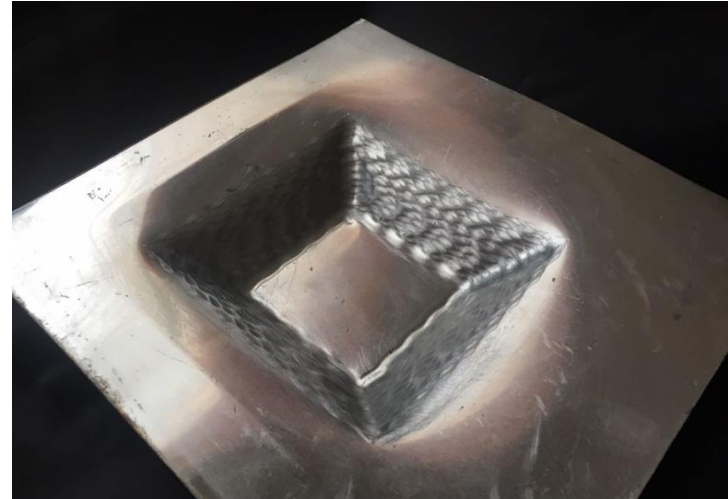
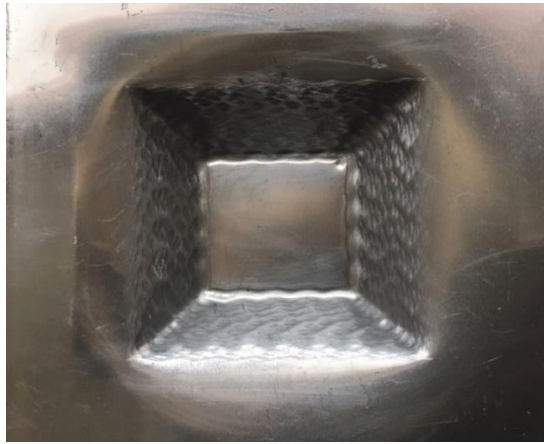
Ensayo 2

Ángulo de penetración: 65°
Profundidad: 28,21 mm
Lado: 57,55 mm



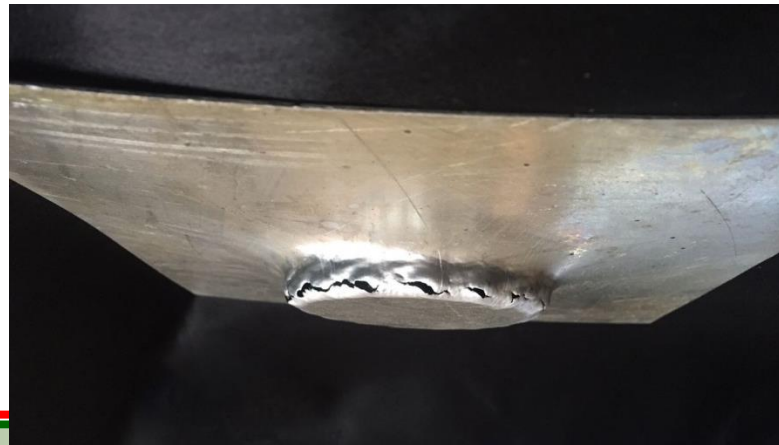
Ensayo 3

Ángulo de penetración: 50°
Profundidad: 28,86 mm
Lado: 58,23 mm



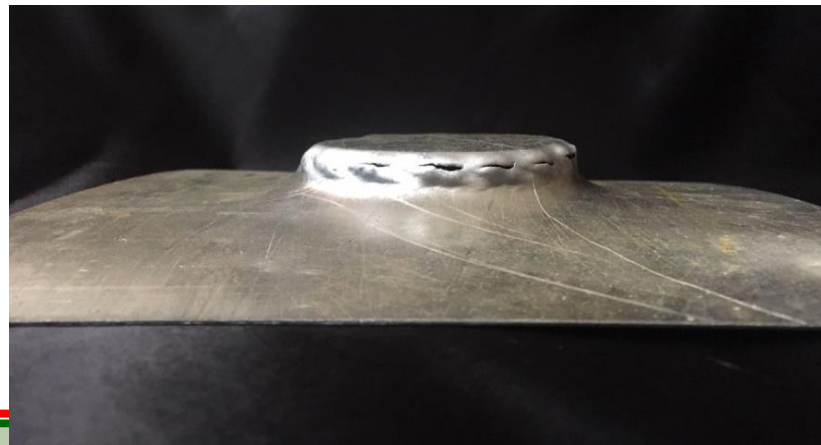
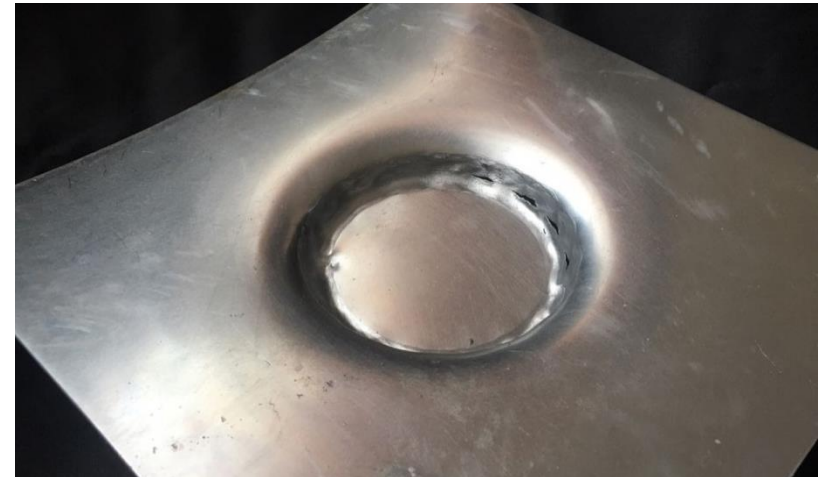
Ensayo 4

Ángulo de penetración: 75°
Profundidad: 10,70 mm
Lado: 58,52 mm



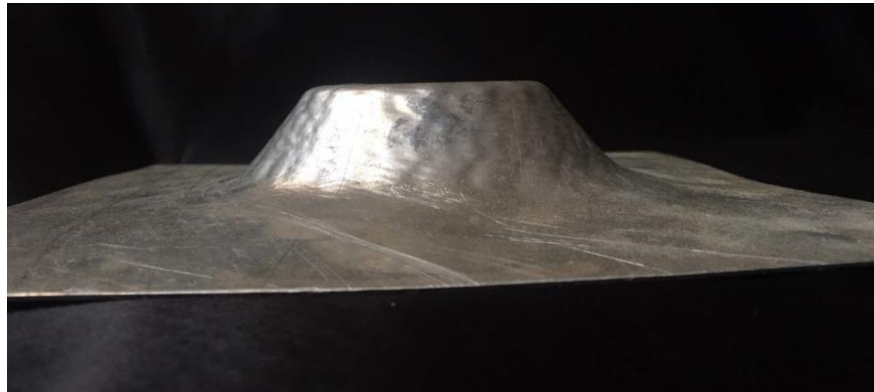
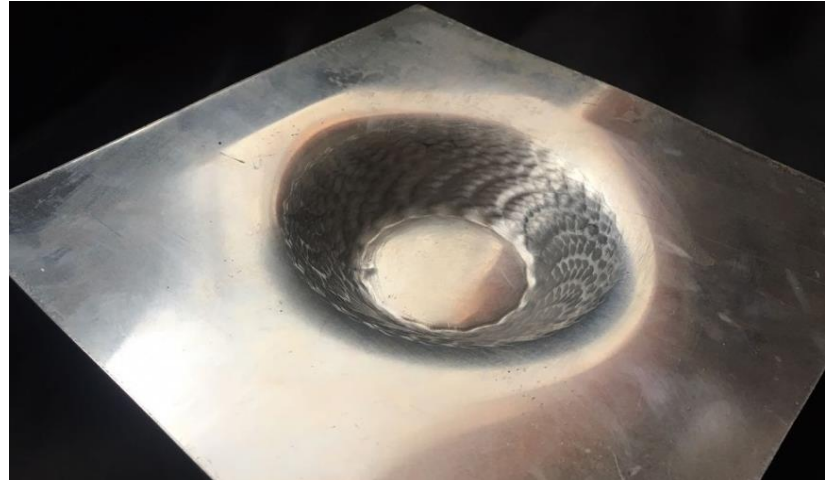
Ensayo 5

Ángulo de penetración: 70°
Profundidad: 12,20 mm
Lado: 59,12 mm



Ensayo 6

Ángulo de penetración: 50°
Profundidad: 27,93 mm
Lado: 58,77 mm



Ensayos		Medidas (mm)		Error (%)	Observaciones
Geometría	Ángulo de penetración	Teórico	Real		
Cuadrado de lado 60mm	Ensayo 1:	Prof.: 30	28.48	5.06	Mayor error en la profundidad
	60°	Lado: 60	58.35	2.75	
	Ensayo 2:	Prof.: 30	28.21	5.96	Mayor error en la profundidad
	65°	Lado: 60	57.55	4.08	
	Ensayo 3:	Prof.: 30	28.86	3.80	Mayor error en la profundidad
	50°	Lado: 60	58.23	2.95	
Círculo de diámetro 60mm	Ensayo 4:	Prof.: 30	10.70	64.33	Rotura a los 10.70mm
	75°	Ø: 60	58.52	2.46	
	Ensayo 5:	Prof.: 30	12.20	59.33	Rotura a los 12.20mm
	70°	Ø: 60	59.12	1.46	
	Ensayo 6:	Prof.: 30	27.93	6.90	Mayor error en la profundidad
	50°	Ø: 60	58.77	2.05	



Rubro o Actividad	Descripción	Costos (\$)	
		Valor unitario	Valor Total
Materiales e Insumos de Investigación			
Material de oficina	Insumos de oficina	25	25
Materiales para la construcción de la herramienta	Material para realización de la herramienta	80	80
	Tratamiento térmico	40	40
Material para construcción del soporte o utillaje de sujeción (blankholder)	Placas para las bridas 250x250mm e:10mm y corte CNC	150	150
	Placa de soporte 270x270mm e:18mm y corte CNC	50	50
	Ejes de 140mm, Ø:30mm	15	60
	Tuercas, pernos y arandelas	10	10
Materiales de prototipos	Láminas de aluminio e:1mm	5	30
Servicios Técnicos de Apoyo			
Contratación de profesionales de apoyo	Tutorías personalizadas	50	50
	Tutoriales descargados de páginas oficiales	50	50
Movilidad	Gastos de movilización	25	25
Recursos Humanos			
Mano de obra contratada	Mano de obra extra	100	100
Total			670

La mayor concentración de costos económicos se encuentran para nuestro caso de estudio en la adquisición del material para la fabricación de herramientas, utillaje y material para ensayo, pero hay que tomar en cuenta que este gasto se realiza una sola vez, y se puede fabricar cualquier tipo de diseño de prototipos, lo cual no sucede en otros procesos de conformado en los que al cambiar el diseño cambia la matricería sumando gastos al total.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA

CONCLUSIONES

Se estudió el proceso de conformado incremental, sus características y propiedades más importantes, así como sus ventajas y desventajas para las futuras aplicaciones. Pero al ser un proceso que no está matemáticamente definido y del cual aún no existe mucha información, se podría cuantificar en que se logró un estudio del 70%, lo que quiere decir que el estudio podría ampliarse.

Se pudo comprobar que el proceso de conformado incremental posee las siguientes ventajas frente a otros procesos de conformado de chapa: bajo costo de la lámina, buena relación resistencia y peso, fácil conformación, automatización del proceso de producción, precisión de trabajo, acabado superficial y trabajo en frío, aunque aspectos en contra a considerar son: los tiempos de producción se incrementan, en relación a otros procesos de producción a gran escala, la producción puede verse limitada a baja escala, no trabaja para ángulos cercanos a los 90°.



En vista de que el proceso de conformado incremental no requiere de matrices de ningún tipo abarata los costos de fabricación, además de poder realizar cambios de medidas y tallas en los diseños sin ninguna complicación alguna, lo cual lo hace viable para el prototipado rápido.

Se puede contar con un proceso que no requiere altas velocidades de giro del usillo, por lo cual no es ruidoso, ni requiere de una supervisión excesiva.

Según los resultados obtenidos se pudo observar una imprecisión de geometría entre el diseño deseado y el obtenido al final del proceso de conformado en las medidas, pero este error no pasa del 6% en las piezas que no tuvieron rotura, por lo que podemos decir que para ser las primeras pruebas y ensayos los resultados son satisfactorios.

Se presentó ruptura en dos ensayos del prototipo circular el de 70° y 75° en momentos cuando aún no alcanzaba la profundidad deseada, este efecto lo ocasiona el ángulo de la herramienta, pues se observó para los ensayos realizados que al acercar el ángulo de la herramienta a los 90° y en nuestro caso específico ángulos superiores a 65° se produce ruptura del material conformado.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda y se hace muy necesario evaluar la calidad de la chapa metálica que se adquiriera para el análisis de manera de asegurar las mejores condiciones de esta, pues en el caso de nuestro proyecto, se presentó el inconveniente de la falta de disponibilidad del producto, y una vez ubicada, la calidad de la misma en cuanto a acabado superficial no era el más aceptable, aun cuando sus propiedades físicas y estructurales cumplieran con lo requerido.
- Es necesario en futuros estudios poder manipular y controlar variables de estudio que en nuestro caso no pudo ser evaluado como fue variar el espesor de la lámina, variar el diámetro de la herramienta a utilizar, así como las velocidades de paso, esto con el objetivo de tener un estudio y resultados más concluyentes.



- Se recomienda la utilización de mejores mecanismos de medición y control de variables como por ejemplo: galgas extensiométricas, medición de espesores para láminas, medición con ultrasonido, medición de tensiones, etc, con el objetivo de dar una mejor conclusión del estudio realizado.
- Se recomienda analizar más a profundidad cada tema para futuros estudios, y para poder realizar una implementación de este tipo de conformado en el país, ya que este al ser el primer trabajo sobre el tema, solo es un escalón de subida hacia este nuevo e innovador proceso.
- Se recomienda un uso de utillaje que permita el cambio de lámina o chapa metálica más eficiente, ya que este proceso se hace un tanto tedioso al momento de realizar el cambio de lámina para realizar un nuevo prototipo.
- Se recomienda realizar para futuros trabajos, un completo estudio de deformaciones y tensiones a las cuales es sometido el material durante el proceso de conformado incremental monopunto, este puede llevarse a cabo haciendo uso de un software de elementos finitos.



GRACIAS



ESPE
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CAMINO A LA EXCELENCIA