



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**IMPLEMENTACIÓN BANCO DE ENSAYOS PARA EL USO DEL PVC EN  
CONFORMADO INCREMENTAL**

POR

**Luis Alberto Torres Valdés**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Cristian Alexis Canales Cárdenas

Diciembre 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Luis Alberto Torres Valdés

© 2023 Luis Alberto Torres Valdés

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o  
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

## **Agradecimientos**

Esta memoria está dedicada a todas las personas que me han apoyado durante mi etapa universitaria.

Primero, quiero agradecer a mis padres por ser mi pilar durante todo este proceso, por motivarme en cada momento y por ser las mejores personas que conozco. Agradezco a mis hermanas por la motivación y compañía que me hicieron sentir a pesar de la lejanía. Agradezco a mi tía Clara por las conversaciones diarias y el apoyo brindado durante esta etapa.

Quiero agradecer a mis amigos Felipe, Catalina, Valentina, Geovanni, Francisca y Matías por todo el tiempo compartido y las buenas experiencias vividas.

Agradezco al Departamento de Ingeniería Mecánica y a los profesores, quienes siempre tuvieron una buena disposición, en especial a mi profesor patrocinante Cristian Canales y al profesor Carlos Medina que me han guiado y aconsejado durante este proyecto.

Agradezco la ayuda brindada y los consejos de los maestros del taller en especial a Don Mario y Don Eduardo.

Por ultimo, le agradezco a Dios por darme la oportunidad de estudiar esta carrera y brindarme las fuerzas necesarias en cada momento.

## Resumen

Los procesos de manufactura orientados a productos producidos en lotes pequeños tienen la necesidad de adaptarse a las nuevas demandas, las cuales son cada vez más personalizadas. Sumado al desarrollo tecnológico, se abre la posibilidad de investigar la aplicación de nuevos procesos de fabricación y la implementación de nuevos materiales. Un proceso innovador que permite superar problemas de flexibilidad y disminuir costos es el conformado incremental mono punto SPIF.

Implementar un banco de ensayos para realizar el SPIF es el primer paso para investigar la conformabilidad de diferentes materiales. En este trabajo se pretende diseñar un banco que cumpla con las condiciones para realizar el proceso y fabricar geometrías que permitan caracterizar la deformación mediante herramientas como los ángulos máximos o diagramas límite de conformado.

Comprender los mecanismos de deformación y cómo afectan los distintos parámetros operacionales es crucial para lograr que el SPIF sea implementado en la industria. Por lo que, una vez implementado el banco de ensayos en el centro de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica, se procede a realizar ensayos experimentales del proceso. En primera instancia, se realizan pruebas de línea a diferentes velocidades de avance y de rotación, esto con la finalidad de analizar su influencia en el conformado y precisión geométrica de la pieza fabricada.

Finalmente, se fabrican dos modelos correspondientes a una pirámide y un cono truncados mediante el SPIF. Se presentan los resultados y se analiza la precisión geométrica lograda mediante la medición del espesor y un scanner de la superficie de la pirámide.

## Abstract

Manufacturing processes geared towards small batch production face the need to adapt to new demands, which are increasingly personalized. Coupled with technological development, there is an opportunity to explore the application of new manufacturing processes and the use of innovative materials. An innovative process that addresses flexibility issues and reduces costs is Single Point Incremental Forming (SPIF).

Implementing a test bench for SPIF is the first step in investigating the formability of different materials. This work aims to design a bench that meets the conditions for carrying out the process and manufacturing geometries that allow characterizing deformation through tools such as maximum angles or forming limit diagrams.

Understanding the deformation mechanisms and how they impact various operational parameters is crucial to ensure the implementation of SPIF in the industry. Therefore, once the test bench is implemented in the machining center of the Department of Mechanical Engineering, experimental tests of the process are carried out. Initially, line tests are conducted at different feed and rotation speeds to analyze their influence on the forming and geometric accuracy of the manufactured piece.

Finally, two models corresponding to a truncated pyramid and cone are manufactured using SPIF. The results are presented, and the achieved geometric accuracy is analyzed through thickness measurements and a surface scanner of the pyramid.

## Tabla de Contenidos

1	CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1	Objetivo General.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Hipótesis.....	2
1.4	Metodología.....	3
2	Capítulo 2: Estado del Arte.....	4
3	Capítulo 3: Conceptos previos.....	6
3.1	Procesos de conformado de lámina.....	6
3.1.1	Doblado.....	6
3.1.2	Embutido.....	7
3.1.3	Estampado.....	7
3.1.4	Repujado.....	8
3.1.5	Estirado.....	8
3.1.6	Conformado incremental.....	9
3.2	Conformado incremental mono punto.....	9
3.3	Parámetros del SPIF.....	10
3.3.1	Material de la lámina.....	10
3.3.2	Ángulo de conformado.....	11
3.3.3	Tamaño de la herramienta.....	11
4	Capítulo 4: Diseño de banco de ensayos para SPIF.....	11
4.1	Selección de prototipo.....	11
4.1.1	Importancia del problema.....	11
4.1.2	Formulación del problema.....	12
4.1.3	Lista de requisitos o especificaciones técnicas.....	12
4.1.4	Identificación de subproblemas.....	12
4.1.5	Propuesta de solución.....	14
4.2	Fuerzas en el SPIF.....	14
4.3	Diseño de los componentes del banco de ensayos.....	18
4.3.1	Diseño de la mordaza.....	19
4.3.2	Diseño de las columnas.....	21
4.3.3	Cálculo de los pernos.....	23
4.3.4	Diseño y cálculo de herramienta.....	26

4.4 Cotización de componentes del banco.....	29
4.5 Cotización de lámina de PVC.....	30
4.6 Implementación del banco de ensayos .....	30
5 Capítulo 5: Ensayos y fabricación de prototipos.....	32
5.1 Test de línea.....	32
5.2 Velocidad de avance .....	33
5.3 Velocidad de rotación .....	34
5.4 Fabricación de prototipos .....	35
6 Capítulo 6: Resultados .....	38
6.1 Influencia de la velocidad de avance y de rotación .....	38
6.2 Fabricación prototipos .....	39
7 Capítulo 7: Discusión de resultados .....	42
7.1 Velocidad de avance .....	42
7.2 Velocidad de rotación.....	42
7.3 Forma final de prototipos .....	43
8 Capítulo 8: Conclusiones .....	45
8.1 Trabajos a futuro.....	45
Referencias .....	47

## Lista de Figuras

Figura 1: Esquema proceso de doblado. (Fuente: [20]).	6
Figura 2: Esquema proceso de embutido. (Fuente: [20]).	7
Figura 3: Esquema proceso de estampado. (Fuente: [21]).	8
Figura 4: Esquema proceso de repujado. (Fuente: [22]).	8
Figura 5: Esquema proceso de estirado. (Fuente: [23]).	9
Figura 6: Elementos para realizar ISF. (Fuente: [15]).	10
Figura 7: Equipo para medir fuerza máxima. (Fuente: elaboración propia).	13
Figura 8: Medición de fuerza máxima de forma experimental. (Fuente: elaboración propia).	13
Figura 9: Prototipo de banco de ensayo para SPIF. (Fuente: [29]).	14
Figura 10: Geometría a conformar en simulación. (Fuente: elaboración propia).	15
Figura 11: Fuerzas de reacción en punzón para lámina de PVC de 3 mm de espesor. (Fuente: elaboración propia).	16
Figura 12: Fuerza vertical en función del ángulo de pared. (Fuente: elaboración propia).	17
Figura 13: Fuerza vertical en función del diámetro de la herramienta para un ángulo de pared de 50°. (Fuente: elaboración propia).	18
Figura 14: Diagrama de cuerpo libre de la sección de la brida. (Fuente: elaboración propia).	19
Figura 15: Diagrama de momento flector para una viga empotrada en sus extremos. (Fuente: elaboración propia).	19
Figura 16: Diagrama de cuerpo libre de la columna. (Fuente: elaboración propia).	21
Figura 17: Factores de longitud efectiva. (Fuente: [40]).	22
Figura 18: Sistema de sujeción mordazas. (Fuente: elaboración propia).	24
Figura 19: Fuerza normal y de fricción sobre el perno [39].	24
Figura 20: Diagrama de cuerpo libre de la herramienta.	26
Figura 21: Banco de ensayos montado en CNC.	30
Figura 22: Configuración de mordazas y lámina.	31
Figura 23: Trayectoria de test de línea definida en Mastercam.	32
Figura 24: Interfaz de parámetros operacionales en Mastercam.	33
Figura 25: Resultados de prueba de línea ensayos 1, 2, 3 y 4.	34
Figura 26: Resultados ensayos 5, 6, 7 y 8.	35
Figura 27: Modelo CAD de tronco de cono.	35
Figura 28: Dimensiones cono truncado en mm.	36
Figura 29: Modelo CAD de pirámide truncada.	36
Figura 30: Dimensiones de la pirámide truncada.	36
Figura 31: Trayectoria de la herramienta definida en Mastercam.	37
Figura 32: Profundidad máxima y final para distintas velocidades de avance, con velocidad de rotación de 800 RPM.	38
Figura 33: Profundidad máxima y mínima para distintas velocidades de rotación, con velocidad de avance de 1000 mm/min.	39
Figura 34: Pirámide truncada fabricada mediante SPIF.	40

Figura 35: Tronco de cono fabricado mediante SPIF. ....	40
Figura 36: Corte de pirámide truncada con demarcación de puntos para medir espesor. ....	41
Figura 37: Comparación contorno del modelo CAD con scanner del prototipo fabricado. ....	41
Figura 38: Forma final ensayo con velocidad de avance de 500 mm/min y rotación de 800 RPM...	42
Figura 39: Forma final ensayo con velocidad de avance de 1000 mm/min y rotación de 200 RPM.	43

## Lista de Tablas

Tabla 1: Lista de requisitos y observaciones.....	12
Tabla 2: Características mecánicas del PVC [33]. .....	15
Tabla 3: Parámetros del PVC para modelo de Aerens.....	16
Tabla 4: Resumen costo de materiales. ....	29
Tabla 5: Resumen costos elementos de sujeción. ....	29
Tabla 6: Formatos y costos de láminas de PVC disponibles por Plastigen.....	30
Tabla 7: Ensayos a distintas velocidades de avance. ....	33
Tabla 8: Ensayos a distintas velocidades de rotación. ....	34
Tabla 9: Parámetros operacionales para fabricación de prototipos.....	37
Tabla 10: Recuperación registrada en cada ensayo.....	38
Tabla 11: Porcentaje de recuperación para cada ensayo. ....	39
Tabla 12: Espesor en cada punto y porcentaje de reducción.....	41

## Glosario

AISI	:	American Iron and Steel Institute
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
CAD	:	Computer Aided Design
CAM	:	Computer Aided Manufacturing
CNC	:	Computing Numerical Control
FEM	:	Finite Elemental Method
FLD	:	Forming Limit Diagram
ISF	:	Incremental Sheet Forming
PA	:	Poliamida
PC	:	Policarbonato
PE	:	Polietileno
PEEK	:	Polietereetercetona
PET	:	Polietileno Tereftalato
PMMA	:	Polimetilmetacrilato
PVC	:	Policloruro de Vinilo
SPIF	:	Single Point Incremental Sheet Forming
RPM	:	Revoluciones por Minuto

## Símbolos

$E$	:	Módulo elástico
$\nu$	:	Coefficiente de Poisson
$F_z$	:	Fuerza vertical
$R_m$	:	Esfuerzo último en tracción
$t$	:	Espesor de lámina
$d_t$	:	Diámetro de la herramienta
$\Delta h$	:	Avance vertical de herramienta
$\alpha$	:	Ángulo de pared
$I$	:	Segundo momento de área
$c$	:	Distancia al eje neutro de la viga
$M$	:	Momento flector
$b$	:	Ancho
$h$	:	Espesor
$L$	:	Longitud
$L_e$	:	Longitud efectiva
$K$	:	Constante de fijación de extremos
$r$	:	Radio de giro
$C_c$	:	Relación de esbeltez de transición
$S_y$	:	Esfuerzo de fluencia
$P$	:	Carga total sobre el perno
$P_c$	:	Carga crítica
$P_a$	:	Carga admisible

$P_t$	:	Carga total en tracción
$N$	:	Factor de diseño
$F_i$	:	Precarga
$F_p$	:	Precarga de prueba
$k_b$	:	Rigidez efectiva del perno
$k_m$	:	Rigidez de los elementos del sujetador
$n_p$	:	Factor de seguridad por esfuerzo estático
$n_l$	:	Factor de carga
$n_0$	:	Factor de seguridad contra la separación
$S_p$	:	Resistencia de prueba
$S_e$	:	Resistencia a la fatiga
$S_{ut}$	:	Esfuerzo último en tracción
$C_a$	:	Factor de condición superficial
$C_b$	:	Factor de tamaño
$C_c$	:	Factor de carga
$C_e$	:	Factor de confiabilidad

#### Letras Griegas

$\sigma$	:	Esfuerzo
$\sigma_y$	:	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_a$	:	Esfuerzo admisible
$\lambda$	:	Relación de esbeltez

## CAPÍTULO 1: Introducción

El desarrollo tecnológico durante las últimas décadas ha impulsado la investigación e implementación de nuevas técnicas en los procesos de fabricación presentes en las distintas áreas de la manufactura. Estas técnicas buscan adaptarse a las demandas actuales que se caracterizan por la alta personalización de los productos que muchas veces se busca sean específicos o únicos.

Se puede considerar que existen dos grandes grupos de manufactura, el primero, consiste en la producción de productos simples en grandes cadenas. Por otro lado, se encuentran los productos complejos y altamente especializados producidos en lotes pequeños [1]. Dentro de este último, es donde surge la necesidad de implementar técnicas innovadoras que reemplacen los procesos de deformación de lámina convencionales, tales como el estampado, la embutición o el laminado. Esto debido a que conllevan un alto costo de producción al requerir de una alta inversión en equipos y herramientas especiales, como la fabricación de moldes [2]. Por lo tanto, los procesos convencionales tienen una flexibilidad limitada a la hora de fabricar productos con geometrías complejas y son inviables económicamente para lotes pequeños [3].

Debido a los problemas de costos y flexibilidad en los procesos tradicionales es que el conformado incremental (*Incremental Sheet Forming*, ISF) se presenta como una alternativa innovadora que busca abordar este desafío de fabricación y que ha sido objeto de estudio durante las últimas dos décadas. El ISF es un proceso en que la deformación plástica se produce por el contacto repetido entre una herramienta pequeña y una lámina que se encuentra sujeta a una base. El proceso se caracteriza por el hecho de que en cualquier momento solo se está formando una pequeña parte del producto y la zona de deformación plástica se encuentra en movimiento.

El ISF tiene distintas variantes, una de ellas es el conformado incremental mono punto (*Single Point Incremental Forming*, SPIF), que se diferencia por no utilizar una matriz o contra herramienta para deformar la lámina. Una de las mayores ventajas del SPIF y que lo destaca por sobre los procesos convencionales es su flexibilidad, dado que, manipulando la trayectoria de su herramienta de forma rápida y económica se pueden lograr diferentes resultados en la forma final del producto. Todo esto, se realiza a temperatura ambiente mediante una máquina de conformación genérica guiada por control numérico (*Computer Numerical Control*, CNC) que tiene gran presencia en la industria manufacturera.

La necesidad de tecnologías flexibles y de conformado rápido para empresas que buscan innovar en sus productos dio lugar al desarrollo del ISF. Inicialmente este proceso se desarrolló para las necesidades de los fabricantes de carrocerías [4]. Sin embargo, en la actualidad las distintas variantes del ISF están presentes en muchas industrias, como aeroespacial y marina [5]. Durante los últimos años se ha destacado el potencial del SPIF para distintas aplicaciones médicas, específicamente los implantes biomédicos, que son dispositivos creados para reemplazar, ayudar o mejorar alguna estructura biológica que se ha dañado o perdido. La implementación de nuevos materiales biocompatibles, como los son los polímeros biomédicos, por ejemplo, PEEK y PMMA [6], permitiría reducir los costos de fabricación de miles a cientos de dólares [7]. Además, los procesos actuales para

fabricar estos dispositivos conllevan altos costos, tienen una flexibilidad limitada y generan desperdicio de material. Sin embargo, las láminas poliméricas muestran un comportamiento diferente en comparación con las chapas metálicas, por lo que los trabajos de investigación se han centrado en comprender el comportamiento mecánico de estos materiales poliméricos deformados por el SPIF.

Es importante establecer modelos de fractura dúctil que permitan conocer y predecir las fallas de la lámina durante la formación, tomando en cuenta la influencia de los distintos parámetros operacionales. Lograr esto permitiría disponer de una base teórica robusta con la que se mejora la viabilidad del SPIF para su aplicación en la industria. He aquí la importancia de este proyecto que busca implementar un banco de ensayos para llevar a cabo pruebas del proceso de conformado aplicado a láminas de Policloruro de vinilo (PVC), con la finalidad de establecer una metodología de caracterización de conformado utilizando las distintas investigaciones como base y verificar mediante pruebas experimentales, los modelos de fallas propuestos durante la investigación.

## **1.1 Objetivo General**

Implementar banco de ensayos para el uso de láminas de PVC en el conformado incremental mono punto en el centro de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Diseñar banco de ensayos para realizar el SPIF.
- Fabricar piezas y montar el banco de ensayos en máquina CNC.
- Conocer los límites de conformabilidad del PVC en el SPIF mediante prueba de línea.
- Analizar el efecto de los parámetros operacionales en la forma final.
- Fabricar geometría de pirámide y cono truncados con los resultados obtenidos de la prueba de línea.

## **1.3 Hipótesis**

La aplicación del SPIF en láminas de PVC permitirá fabricar productos de mayor complejidad con un costo menor, en comparación con los materiales y procesos tradicionales de conformado de lámina.

## 1.4 Metodología

En primer lugar, se realiza el levantamiento de información. Se busca describir el proceso de conformado incremental estableciendo sus principios de funcionamiento y las características del proceso. La revisión de la literatura permite establecer una línea temporal que sitúa el estado en que se encuentra el desarrollo del SPIF. Con esto, se busca esclarecer los tópicos pendientes de la investigación y cómo abordarlos mediante este proyecto.

La segunda etapa consiste en diseñar el banco de ensayos para realizar las pruebas del conformado incremental, en donde se analizan los distintos prototipos usados por investigadores para seleccionar la mejor alternativa y realizar modificaciones si es requerido. Se establecen las condiciones para un correcto funcionamiento del proceso, dentro de los cuales se encuentran las dimensiones del espacio de trabajo y las fuerzas de operación en la CNC a utilizar. En base a lo anterior, se procede a dimensionar las distintas piezas que componen el banco considerando el tipo de lámina a conformar.

En la tercera etapa se debe gestionar la adquisición de los materiales para la fabricación de las piezas que componen el banco de ensayos. Para esto, se identifican los proveedores y se analizan los formatos y precios disponibles de los materiales requeridos. Posteriormente, se realiza una cotización de los materiales y herramientas necesarias. Una vez se tienen los materiales, se deben fabricar las piezas en el Centro de Mecanizado de la Facultad de Ingeniería. En esta etapa, también se plantea la adquisición de las láminas de PVC a conformar, identificando proveedores para analizar los costos asociados a los formatos disponibles.

Una vez fabricadas las piezas se debe ensamblar el banco de ensayos e implementarlo en la CNC. Se realizan pruebas de línea, en donde se evalúa el efecto de parámetros operacionales como el avance vertical, la velocidad de avance y de rotación en la conformabilidad del PVC. Finalmente, para demostrar la capacidad de fabricar geometrías de lámina mediante el SPIF se generan dos prototipos para estudiar; una pirámide y un cono truncados. Se realizan mediciones para conocer la precisión geométrica lograda.

## Capítulo 2: Estado del Arte

El primer antecedente que se tiene del SPIF se encuentra documentado por la patente Leszak en el año 1967, buscaba producir piezas de lámina mediante la formación incremental, sin embargo, esta idea no tuvo una implementación real [8]. En la década de los 90, debido los avances de la tecnología de conformado de lámina, la investigación se centró en el desarrollo de nuevas técnicas de control del proceso y en la mejora de la conformabilidad a través de ensayos experimentales [3].

En el artículo de 2005, Jeswiet et al. [9] logró traer todo el conocimiento actual en ese momento y sintetizarlo en una revisión integral del progreso. Con lo anterior, también se demostró la factibilidad del SPIF para producir lotes pequeños de piezas de láminas metálicas en una amplia gama de espesores y formas geométricas. Desde entonces, se han utilizado materiales diferentes en el proceso, incluida una variedad de metales, láminas de polímeros y otros como paneles sándwich [10]. En este proceso de expansión es donde destaca el PVC por parte de algunos autores. El interés por este material se puede explicar por su bajo costo comercial y características mecánicas que lo hacen atractivo para su implementación en el SPIF. Sin embargo, los estudios del PVC en el proceso de conformado son más bien preliminares, puesto que se han centrado en conocer el efecto de algunos parámetros operacionales como el diámetro del punzón o el ángulo de pared. Este es el caso de V. Franzen, quien en su estudio del 2008 sobre el SPIF se centró en la caracterización y evaluación de los límites de conformabilidad del PVC. Los resultados permiten concluir que la conformabilidad del PVC es mejor que la del latón y muy similar a la lograda con aleaciones de aluminio y acero dulce para aplicaciones de embutición profunda. Compara los resultados del uso de herramientas de formación, las diferencias indican que al cambiar de la herramienta de 15 mm de diámetro a la de 10 mm mejora el acabado de la superficie en casi un 75% [3].

En 2008, V. S. Le et al [11] realizaron estudios preliminares para analizar el potencial del SPIF en materiales termoplásticos, los experimentos para caracterizar el material se definieron mediante el ángulo de pared máximo antes de alcanzar la falla. En 2009, P. Martins et al [12] llevaron a cabo experimentos para analizar la conformabilidad, la precisión, los modos de falla y las influencias en la conformabilidad de cinco polímeros termoplásticos. También, evaluó los cambios de color de la lámina durante el proceso formando gradualmente conos con ángulos de pared creciente mediante CNC. Identifica el polietileno (PE) y la poliamida (PA) como los más adecuados para piezas con grandes ángulos de pared, además, el PVC mostró la recuperación elástica más baja y la mejor precisión de la pieza en comparación con otros polímeros. En 2011, Silva et al [13] proponen un modelo teórico basado en tensiones de membrana para el SPIF en polímeros bajo condiciones de deformación plana. En 2012, A. Tania et al [14] estudian distintas variables del proceso como la mecánica de deformación y la influencia de la fricción. De este último, concluye que está directamente relacionado con la acumulación de daño dúctil y que cuanto mayor sea el radio de la herramienta, menor será la conformabilidad de ciertos polímeros como, el policarbonato (PC) y el polietileno tereftalato (PET).

En 2015, M.A. Davarpanah et al [15] investigaron los efectos de la profundidad incremental y la rotación de la herramienta en los modos de falla y las propiedades microestructurales. Además, evalúa el efecto de la trayectoria en la calidad superficial de piezas poliméricas conformadas por SPIF.

Recientemente, M. García et al [16] realizaron un estudio preliminar sobre el uso de láminas poliméricas biodegradables impresas en 3D para la fabricación de prótesis médicas por medio de SPIF, mediante esta combinación de tecnologías se estableció la Policaprolactona (PCL) como una buena alternativa para ser utilizada en prótesis.

Existe una base teórica que ha sido utilizada por los distintos investigadores para comprender los mecanismos de deformación del proceso que se puede dividir en tres categorías: la aplicación de metodologías de caracterización de la conformabilidad, como diagramas de límites de formación (*Forming Limit Diagram*, FLD), el estudio del efecto de parámetros específicos del proceso SPIF en la conformabilidad del material y la predicción de fracturas a través del Método de Elementos Finitos (MEF) [6]. La forma clásica de analizar la conformabilidad dentro del FLD puede ayudar a comprender el efecto de los parámetros del proceso. Sin embargo, la complejidad del SPIF va más allá de del alcance de este enfoque [17]. Efectos como la disminución del espesor antes de la estricción o falla sin estricción son difíciles de capturar mediante este método. Por lo tanto, el FLD debe considerarse como una herramienta útil que brinda información importante sobre la conformabilidad del material, pero no como la herramienta definitiva para su caracterización. Por otro lado, la revisión de la literatura muestra una cantidad relativamente escasa de investigación del SPIF relacionada con el daño. Una posible explicación es que el análisis de daños a menudo no proporciona soluciones simplificadas en términos de los parámetros del proceso de formación. En 2004, Hirt et al [18] investigaron los límites de formado y su optimización aplicada a CNC, utilizó el modelo de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) para identificar parámetros que influyen en la propagación del daño. Estas predicciones mostraron que se pueden lograr límites de formación más altos con herramientas de formación pequeñas y valores grandes de paso vertical.

## Capítulo 3: Conceptos previos

### 3.1 Procesos de conformado de lámina

Es habitual referirse a un material con un espesor por debajo de 6.35 mm como una lámina y a los materiales más gruesos como una placa. En la actualidad, diversas áreas industriales utilizan los procesos de conformado para producir piezas de distintas geometrías a partir de láminas metálicas, en donde es bastante común la fabricación de componentes con formas, que van desde carcasas de artículos electrónicos hasta carrocerías de automóviles [19].

Los procesos de conformado tradicionales tienen beneficios al ser usados para la producción de grandes lotes, estas ventajas son el bajo costo, facilidad de automatizar procesos, alta precisión dimensional, buen acabado superficial y alta resistencia. Los punzones y matrices son las herramientas básicas de conformado y corte que se utilizan en el conformado de láminas. Estas herramientas se montan en prensas que proporcionan las fuerzas necesarias para acomodar las piezas a trabajar.

A continuación, se presenten los principales procesos de conformado de lámina, incluyendo el conformado incremental, que es un proceso emergente de manufactura.

#### 3.1.1 Doblado

El doblado es una de las operaciones industriales de formado más comunes, puesto que mediante este proceso se les da forma a muchos productos como, por ejemplo, electrodomésticos o la carrocería de un automóvil. En este proceso la deformación plástica se localiza en una zona pequeña, permaneciendo el resto del material sin deformaciones. Una operación de flexión provoca una deformación a lo largo de un eje, pero se puede realizar una secuencia de varias operaciones diferentes para crear una pieza compleja [20].

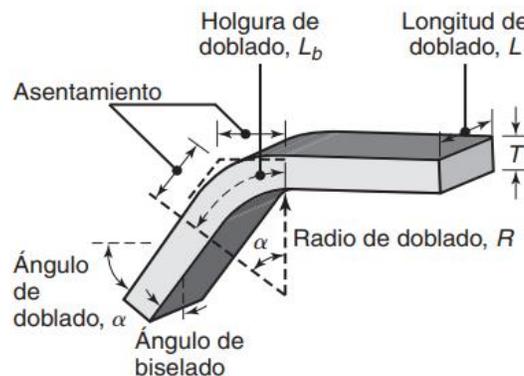
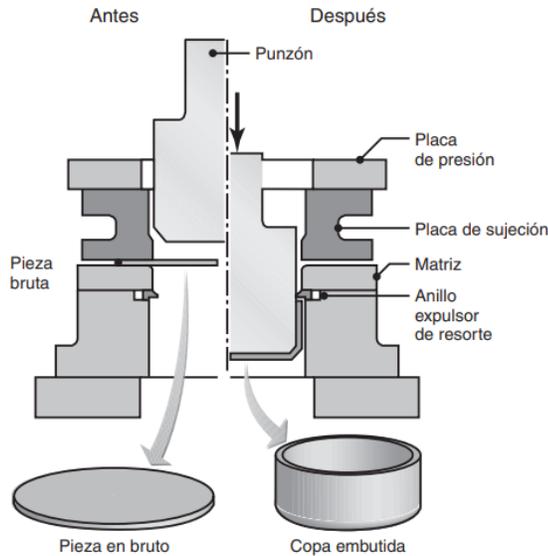


Figura 1: Esquema proceso de doblado. (Fuente: [20]).

### 3.1.2 Embutido

El embutido es una operación de conformado de láminas que se usa para hacer piezas de forma cilíndrica o de caja, como contenedores para alimentos y bebidas. El proceso consiste en ubicar una lámina de metal sobre la abertura de una matriz circular y se mantiene en su lugar con una placa de sujeción. La deformación se produce mediante un punzón que empuja la lámina dentro de la cavidad de la matriz.



**Figura 2: Esquema proceso de embutido. (Fuente: [20]).**

### 3.1.3 Estampado

El proceso consiste en deformar plásticamente la lámina de metal mediante una carga de compresión que se realiza entre dos moldes o matrices. Se tiene un molde inferior que permanece estático y un molde superior que aplica la presión sobre la lámina de manera progresiva, para lo cual se usan prensas o martinets. Se utiliza para la producción en alto volumen de piezas planas como chasis de automóviles o de artículos electrónicos [21]

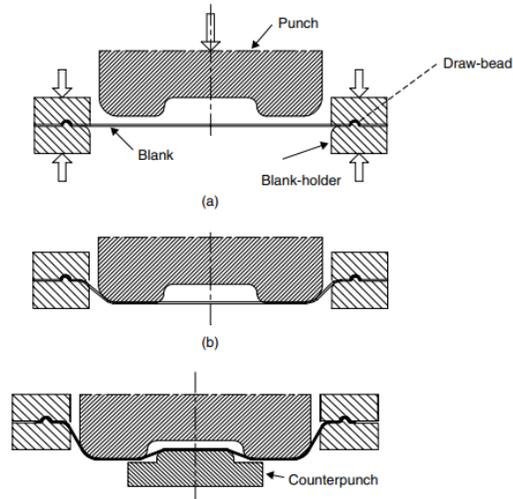


Figura 3: Esquema proceso de estampado. (Fuente: [21]).

### 3.1.4 Repujado

El repujado es un proceso de conformado en el cual se obtienen piezas de revolución de simetría axial a partir de una lámina de metal que se mantiene contra un mandril y se gira, mientras que una herramienta rígida o rodillo da forma al material sobre el mandril. El espesor del material permanece sin cambio respecto al espesor de la forma inicial. El proceso es adecuado principalmente para formas cónicas y curvilíneas, en bajas cantidades. Los productos que se pueden generar mediante este proceso van desde componentes de iluminación, como lámparas hasta cubiertas de motores de cohetes [22].

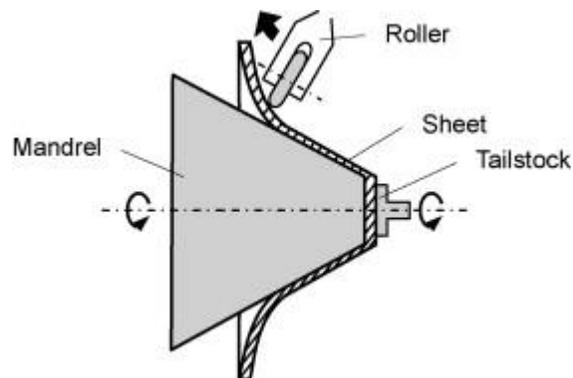


Figura 4: Esquema proceso de repujado. (Fuente: [22]).

### 3.1.5 Estirado

En el conformado por estiramiento, la lámina se sujeta por sus extremos para ser estirada y doblada simultáneamente sobre un troquel (matriz de forma). De esta manera se logran grandes piezas contorneadas. A medida que el troquel se introduce en la hoja, que se agarra firmemente en sus bordes,

las fuerzas de tracción aumentan y la lámina se deforma plásticamente en una nueva forma. Estiramiento típico se utiliza para crear piezas grandes como paneles curvos, paneles de puertas de automóviles o de las alas de aviones [23].

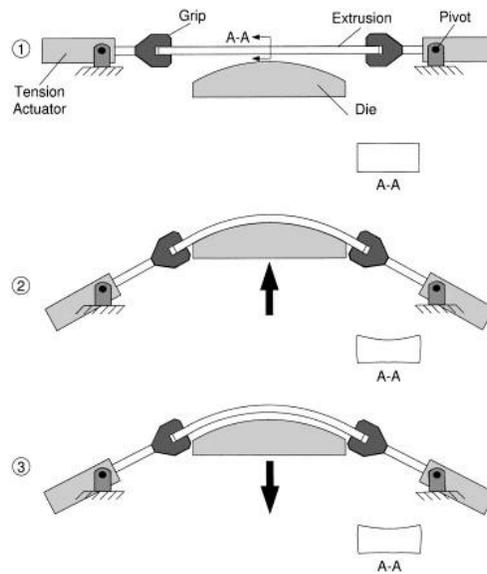


Figura 5: Esquema proceso de estirado. (Fuente: [23])

### 3.1.6 Conformado incremental

El conformado incremental permite, a diferencia de los procesos convencionales, generar piezas con geometrías complejas a un bajo costo de operación. Se pueden lograr geometrías típicas de otros procesos como la embutición, siendo técnicas muy distintas. La fabricación de piezas de lámina consiste en generar sucesivas y pequeñas deformaciones sobre la lámina mediante un pequeño punzón esférico, hasta que la suma de estas deformaciones logró la geometría deseada. El proceso de guía se realiza mediante el control numérico de la herramienta, haciendo que siga una trayectoria que genere la forma final [24].

### 3.2 Conformado incremental mono punto

El proceso de conformado incremental mono punto SPIF es una de las variantes del conformado incremental y consiste en deformar la lámina mediante una herramienta con punta esférica, la cual sigue una trayectoria programada por CAM. La deformación es localizada en una pequeña zona que se encuentra en movimiento, además realizando pequeños incrementos de profundidad se puede

generar la geometría de la pieza. El proceso es ideal para la creación rápida de prototipos y se caracteriza por no usar matrices ni herramientas especializadas.

El proceso consiste en crear la geometría CAD de la pieza y generar la trayectoria mediante un software CAM para implementarlo en una CNC. La trayectoria de la herramienta se puede diseñar como un perfil de contorno o un perfil helicoidal, este último tiene la ventaja de no dejar una marca distintiva del inicio de cada incremento en la superficie deformada, lo que mejora el acabado superficial [25].

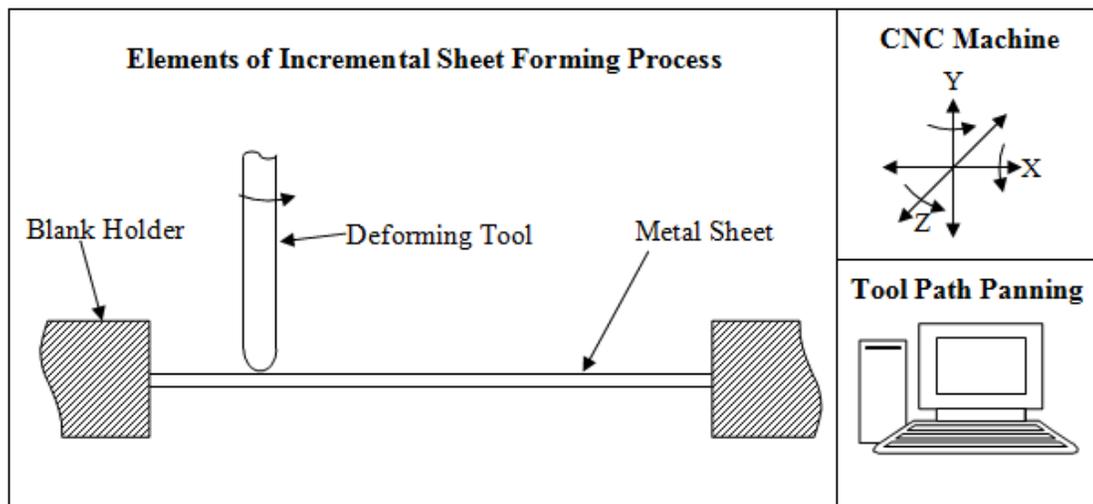


Figura 6: Elementos para realizar ISF. (Fuente: [15])

### 3.3 Parámetros del SPIF

De las distintas investigaciones se identifican los principales parámetros del proceso que tienen influencia en el resultado final de la pieza. A continuación, se presentan los aspectos generales de los parámetros más importantes.

#### 3.3.1 Material de la lámina

La literatura ha demostrado que el tipo de material afecta en la conformabilidad y los límites de formación del SPIF. Las propiedades físicas y la estructura del material influyen, por ejemplo, en la fricción y en el tipo de falla. El proceso además sufre un gran fenómeno de recuperación elástica una vez se eliminan las cargas de conformado lo que genera inexactitud geométrica en los materiales dúctiles [26]. En este sentido, el PVC ha destacado por su baja recuperación elástica en comparación a otros polímeros.

### **3.3.2 Ángulo de conformado**

El ángulo de conformado se refiere al ángulo entre la lámina horizontal sin deformar y la lámina deformada. Este ángulo viene a ser uno de los principales parámetros utilizados para caracterizar la conformabilidad de los distintos materiales. El ángulo máximo es el mayor ángulo formado en la pieza sin fallas y puede estar relacionado con otros parámetros, como lo es el caso del tamaño de la herramienta debido a que para herramientas más pequeñas se pueden aumentar los ángulos máximos [27].

### **3.3.3 Tamaño de la herramienta**

El tamaño de la herramienta es un parámetro que afecta directamente al acabado superficial de la pieza. La punta de la herramienta suele ser esférica o semiesférica, con distintos diámetros que van desde 4 mm hasta los 20 mm [28].

Los resultados de experimentos demuestran que una herramienta más pequeña implica mayor conformabilidad de la lámina y menores fuerzas de conformado. Sin embargo, al disminuir el área de contacto se deben usar herramientas más resistentes que soporten las altas tensiones. Por otro lado, el calentamiento debido a la fricción es mayor para herramientas pequeñas.

## **Capítulo 4: Diseño de banco de ensayos para SPIF**

### **4.1 Selección de prototipo**

#### **4.1.1 Importancia del problema**

El objetivo es conocer el comportamiento que tiene el proceso de conformado incremental, por lo que la implementación del banco permitirá realizar un posterior análisis de los mecanismos de deformación para lograr predecir el comportamiento y las fallas presentes en el proceso. Con esto, se busca aportar tecnología a la manufactura de productos mediante máquinas CNC. Destacando en este caso, la capacidad de generar geometrías complejas en un corto período de tiempo.

### 4.1.2 Formulación del problema

Los procesos tradicionales de conformado de lámina presentan distintas limitaciones que impiden generar productos con geometrías complejas. Por lo que, existe una necesidad de implementar nuevas tecnologías para satisfacer estas demandas que, a su vez, permitan utilizar los equipos presentes en la industria como los son las maquinas CNC.

### 4.1.3 Lista de requisitos o especificaciones técnicas.

Las especificaciones técnicas son la base para realizar el diseño del banco, se deben tomar en consideración factores como el ensamblaje y las dimensiones máximas de trabajo.

**Tabla 1: Lista de requisitos y observaciones.**

<b>Requisitos</b>	<b>Observación</b>
Geometría	Delimitada por mesa de CNC y área de trabajo
Cinemática	Estática
Fuerzas	Hasta 5.2 kN
Material	Resistente para cumplir requisito de geometría
Seguridad	Medidas sujeción del banco sobre la mesa
Ergonomía	Diseño para implementar en CNC
Producción	Solo una unidad
Ensamblaje	Facilidad de montaje y desmontaje
Operación	En Centro de mecanizado de la facultad de ingeniería
Mantenimiento	Realizable por usuario

### 4.1.4 Identificación de subproblemas

- Movilidad.
- Ensamblaje.

El banco de ensayos se utilizará en una maquina CNC del centro de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica, en donde se realizan distintos trabajos e investigaciones mediante esta máquina, por lo que su uso está condicionado a la disponibilidad. Por lo tanto, es importante diseñar una estructura de fácil ensamblaje y movilidad, por lo que estos criterios cobran mayor relevancia a la hora de seleccionar un prototipo y/o realizar modificaciones al diseño elegido.

La máquina CNC corresponde al modelo XH7126, con un tamaño de la mesa de 650x260 mm, velocidad máxima del eje de 6000 RPM y velocidad máxima de desplazamiento en las 3 direcciones de 15 m/min. La distancia entre la punta del husillo y la mesa de trabajo es de 520 mm. El diámetro

máximo de herramienta es de 130 mm. La carga máxima se determinó de forma experimental utilizando un indicador digital modelo PT200M y una celda de carga modelo LPCH-2.5, la cual soporta una carga máxima de 2500 kilos. Con esto, se determina que la máquina CNC puede ejercer una carga máxima de 1700 kilos en la dirección vertical antes de la detención de seguridad.



**Figura 7: Equipo para medir fuerza máxima. (Fuente: elaboración propia).**



**Figura 8: Medición de fuerza máxima de forma experimental. (Fuente: elaboración propia).**

#### 4.1.5 Propuesta de solución

En base a la lista de requisitos se investigan distintos prototipos de bancos de ensayos para realizar el conformado incremental mono punto. Para este caso, se selecciona el prototipo presentado en la Figura 9, puesto que solucionaría de mejor manera los subproblemas identificados, ya que presenta un ensamblaje de menor complejidad y permitiría tener una mejor movilidad de los distintos elementos del banco [29].

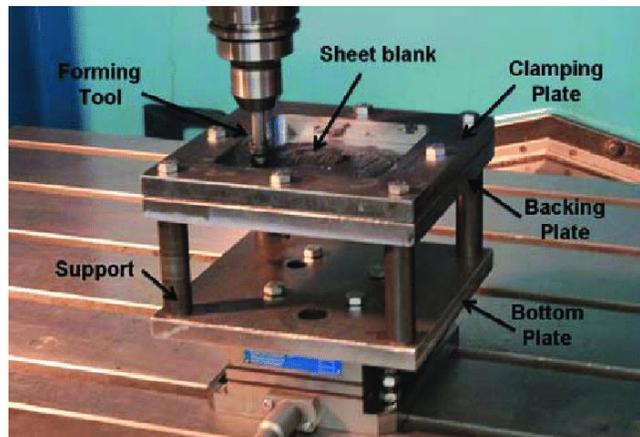


Figura 9: Prototipo de banco de ensayo para SPIF. (Fuente: [29]).

Por otro lado, el hecho de tener una mordaza inferior con una superficie mayor permite que las fuerzas de la herramienta sean distribuidas de mejor manera en la lámina, impidiendo la formación de pendientes que no están contempladas en la geometría final.

Para mejorar el diseño se pueden modificar componentes, en este caso se pretende cambiar el sistema de fijación de las columnas, en vez de usar un pasador se fijará por una unión roscada. Con esto, se busca tener mayor facilidad de ensamble y tener un anclaje más robusto.

#### 4.2 Fuerzas en el SPIF

Una de las consideraciones clave en el diseño del banco de ensayos para realizar el conformado incremental es la fuerza de conformado. En general, una de las formas de conocer una referencia de esta fuerza es mediante simulaciones numéricas del proceso. El objetivo es conocer el efecto de los parámetros que influyen en el proceso por lo que realizar simulaciones de distintos tamaños de herramientas, avances verticales y/o espesores de láminas de distintos materiales conlleva un alto costo de recursos. Por lo anterior, se recurre a uno de los diferentes modelos de estimación de fuerza para el SPIF, en este caso el proporcionado por Aereus [30] que ha sido ampliamente utilizado. Proporciona un modelo basado en experimentos y permite relacionar parámetros como el espesor de la lámina y el diámetro de la herramienta. Se relaciona la resistencia a la tracción del material con la fuerza en la dirección axial mediante la siguiente relación:

$$F_z = 0.0716 R_m t^{1.578} d_t^{0.41} \Delta h^{0.09} \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

Donde  $R_m$  es el esfuerzo último en tracción de la lámina en  $\text{N/mm}^2$ ,  $t$  es el espesor de la lámina expresado en mm,  $d_t$  es el diámetro de la herramienta en mm,  $\Delta h$  es el avance vertical de la herramienta en mm y  $\alpha$  es el ángulo de pared en grados.

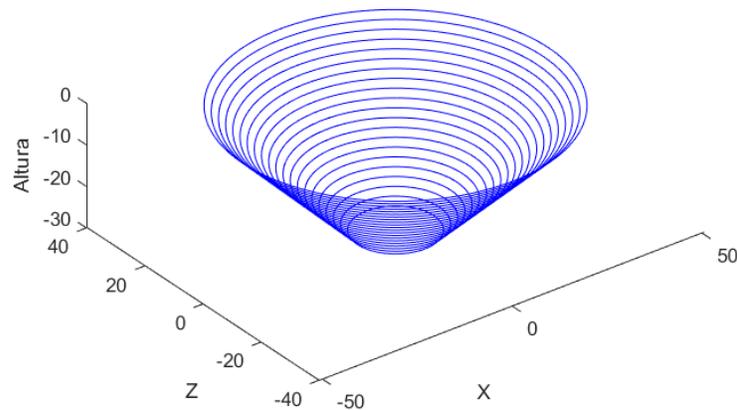
Cabe mencionar que el modelo de Aereus no considera ciertos efectos como el endurecimiento por deformación que aumenta la resistencia del material, lo que aumenta la fuerza de contacto resultante entre la herramienta y la lámina. Además, la flexión solo se considera indirectamente. Sin embargo, una de las ventajas de este modelo analítico es que es mucho más rápido obtener una estimación de la fuerza de estado estacionario, lo que permite una selección rápida de los parámetros del proceso de conformado [31].

Para verificar la efectividad del modelo se presentan resultados de una simulación numérica del conformado incremental [32]. Se trata de una lámina de PVC de 3 mm de espesor, dimensiones de trabajo de 100x100 mm y diámetro de herramienta de 7 mm. Las características del material se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2: Características mecánicas del PVC [33].**

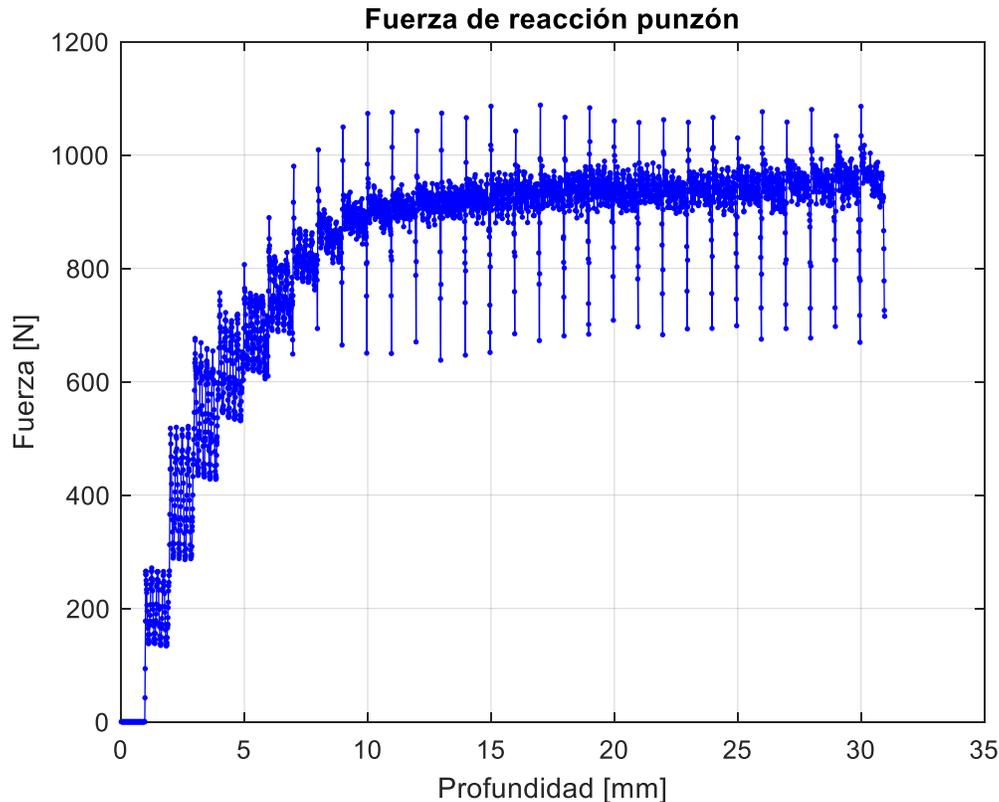
<b>Característica mecánica</b>	<b>Valor</b>
Módulo de elasticidad $E$ [MPa]	1023.50
Esfuerzo de fluencia $\sigma_y$ [MPa]	45.46
Coefficiente de Poisson $\nu$ [-]	0.41

La geometría generada se presenta en la Figura 10, la cual corresponde a un cono truncado de radio superior de 40 mm, radio inferior de 10 mm y una profundidad de 30 mm. Se utiliza 1 mm de avance vertical de la herramienta.



**Figura 10: Geometría a conformar en simulación.**  
(Fuente: elaboración propia).

La fuerza de reacción de la herramienta en función de la profundidad se grafica en la Figura 11. La fuerza promedio en este caso es de 811.5 N y la fuerza máxima alcanza los 1087.9 N.



**Figura 11: Fuerzas de reacción en punzón para lámina de PVC de 3 mm de espesor. (Fuente: elaboración propia).**

La Tabla 3 presenta los parámetros necesarios para evaluarlos en el modelo analítico de Aerens, en donde el parámetro material correspondiente al esfuerzo último en tracción se extrae del estudio de caracterización del PVC de G. Manuel [33].

**Tabla 3: Parámetros del PVC para modelo de Aerens.**

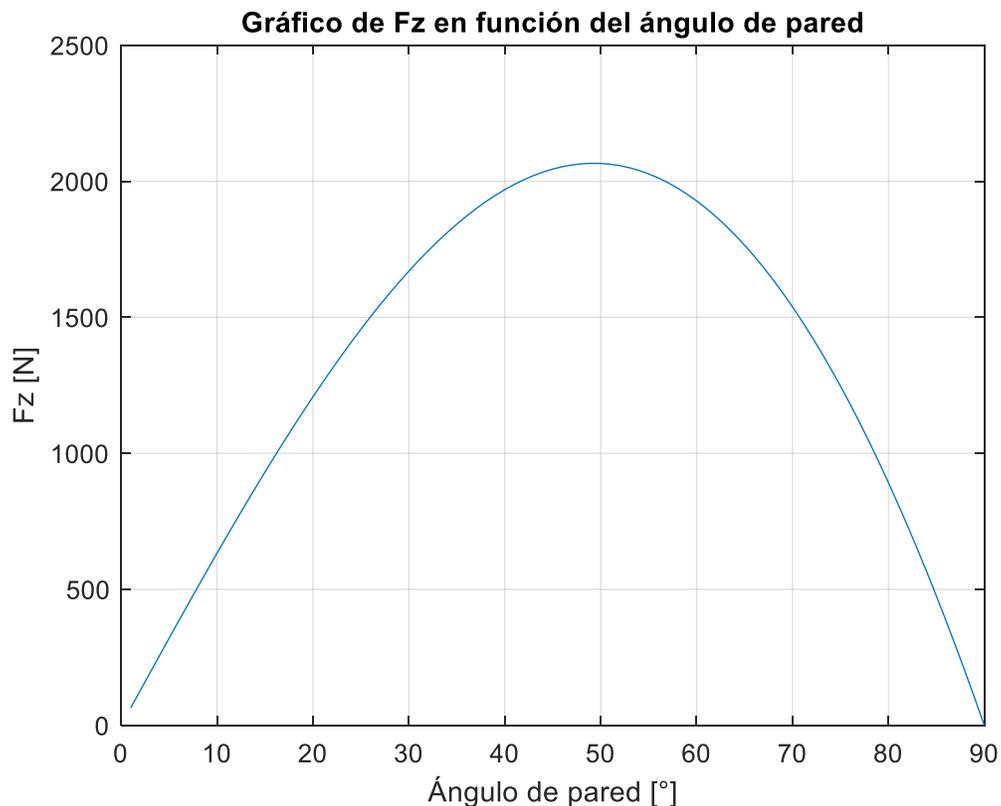
Parámetro	Valor
Esfuerzo último [N/mm <sup>2</sup> ]	52.1
Diámetro herramienta [mm]	7
Espesor lámina [mm]	3
Avance vertical [mm]	1
Angulo de pared [°]	63

Finalmente, evaluando estos parámetros en el modelo de Aerens se obtiene que la fuerza máxima tiene un valor de 1111.5 N, muy similar a los 1087.9 N obtenidos por simulación.

Teniendo esta herramienta capaz de predecir la fuerza máxima sobre la herramienta dependiendo de parámetros de la lámina a conformar, queda establecer la carga que deberá soportar el banco de

ensayos a implementar. Para esto, se consideran las investigaciones llevadas a cabo por otros autores como V. Franzen [3], que estudia los distintos tipos de fallas generadas en el SPIF de láminas de PVC con espesor de 2 y 3 mm, con diámetros de herramienta de 10 y 15 mm. P. Martins [12] realizó ensayos del proceso en distintos polímeros con los mismos espesores, pero con diámetros de 5 y 7.5 mm. Por último, en la revisión realizada el año 2016 sobre las tendencias del SPIF [31] se resumen avances de autores que analizaron distintos materiales, en donde los aluminios estudiados tenían un espesor máximo de 2 mm y los polímeros de 3 mm, mientras que el diámetro de herramienta estaba entre 5 y 10 mm. En base a esto, y con la finalidad de ampliar el campo de estudio a futuro es que se plantea conformar láminas de PVC de hasta 4 mm de espesor.

Sabiendo que las láminas de PVC a conformar serán de hasta 4 mm de espesor, falta conocer la influencia de otros parámetros en el modelo de Aereus. Para esto, en la Figura 12 se presenta la fuerza axial  $F_z$  en función del ángulo  $\alpha$  considerando los valores de la Tabla 3.

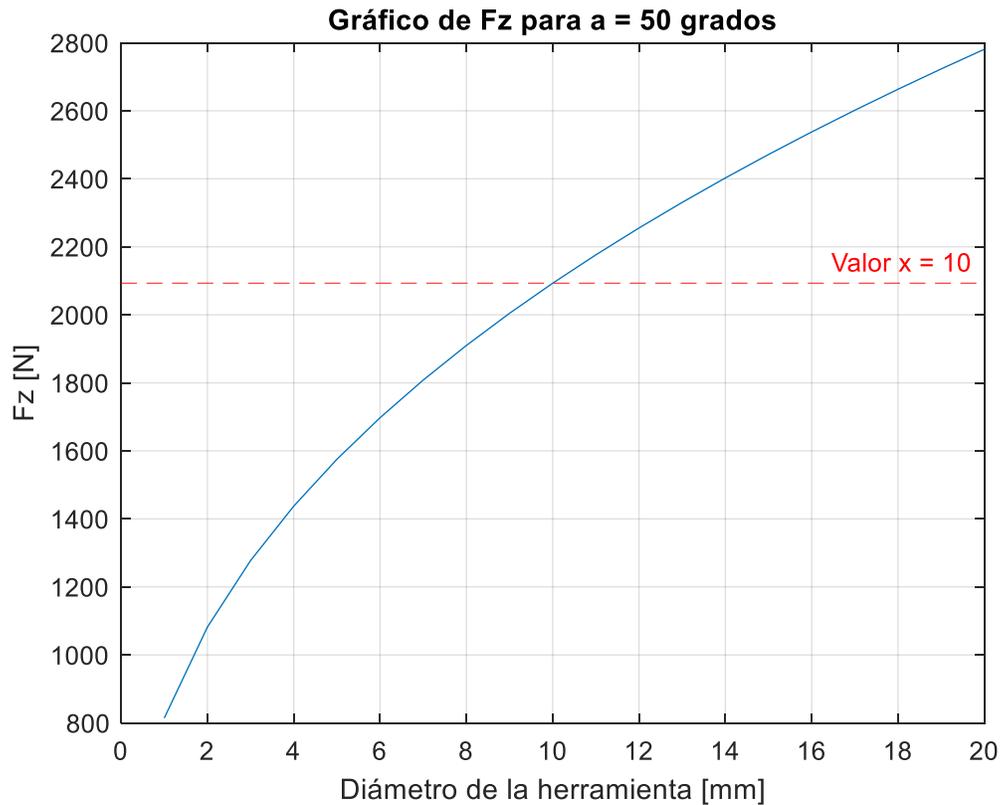


**Figura 12: Fuerza vertical en función del ángulo de pared. (Fuente: elaboración propia).**

Se identifica que la fuerza máxima generada en el eje vertical sería aproximadamente 2092 N y se produce para un ángulo de pared de 50°.

Falta conocer la influencia del diámetro de la herramienta, para esto se considera la fuerza máxima obtenida anteriormente para el ángulo de pared de 50°. En la Figura 13, se grafica la fuerza vertical  $F_z$  en función del diámetro de la herramienta, manteniendo constante el ángulo de 50° y el espesor máximo de 4 mm.

En este caso, considerando la fuerza máxima determinada anteriormente correspondiente a 2092 N, se determina que es posible conformar láminas de 4 mm con un diámetro de herramienta de máximo 10 mm. Por lo tanto, este valor de fuerza se utilizará para diseñar el banco de ensayos, el cual permitirá conformar láminas de PVC de hasta 4 mm de espesor y de aluminio de hasta 1.7 mm, este último bajo ciertas condiciones como una herramienta de máximo 7.5 mm de diámetro.



**Figura 13: Fuerza vertical en función del diámetro de la herramienta para un ángulo de pared de  $50^\circ$ . (Fuente: elaboración propia).**

### 4.3 Diseño de los componentes del banco de ensayos

En este capítulo se determinan las dimensiones de cada componente del banco de ensayos considerando condiciones críticas para cada uno y tomando las cargas como estáticas. En el capítulo anterior se establece que la fuerza máxima durante el proceso alcanzaría los 2100 N en la dirección vertical para el caso de láminas de PVC de 4 mm de espesor. Los datos de fuerza vienen de una simulación del proceso de una lámina de 3 mm, también se usó el modelo de Aerns para estimar la fuerza máxima en los 4 mm y para una lámina de aluminio de 1.7 mm de espesor. Tomando en cuenta esta información, es que se establece un factor de seguridad de 2 para asegurar que el diseño de la estructura garantice el funcionamiento del proceso [34].

### 4.3.1 Diseño de la mordaza

Para determinar las dimensiones de la mordaza se establece una simplificación del sistema, en este caso considerando que la mordaza es cuadrada se calculan las dimensiones de un solo lado, el cual se encontraría empotrado en sus extremos.

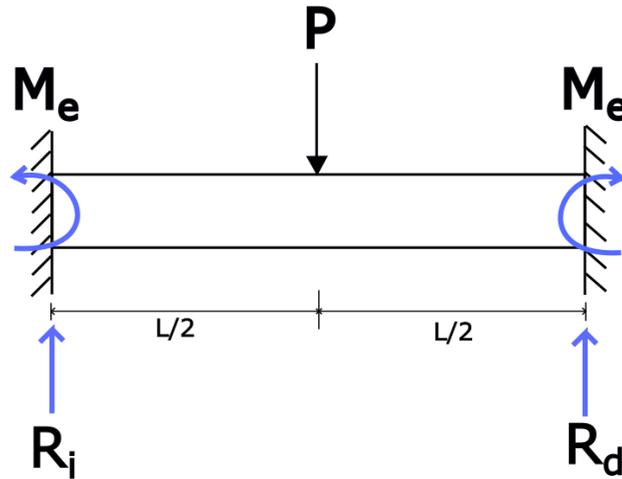


Figura 14: Diagrama de cuerpo libre de la sección de la brida. (Fuente: elaboración propia).

Se considera como configuración crítica que podría sufrir la sección de la mordaza la aplicación de la fuerza máxima como una carga puntual en el centro. Para el caso, el momento flector de mayor magnitud se encuentra en el centro y en los extremos de la viga como se aprecia en la Figura 15, en donde además se presenta el valor de este momento en función de la carga y el largo.

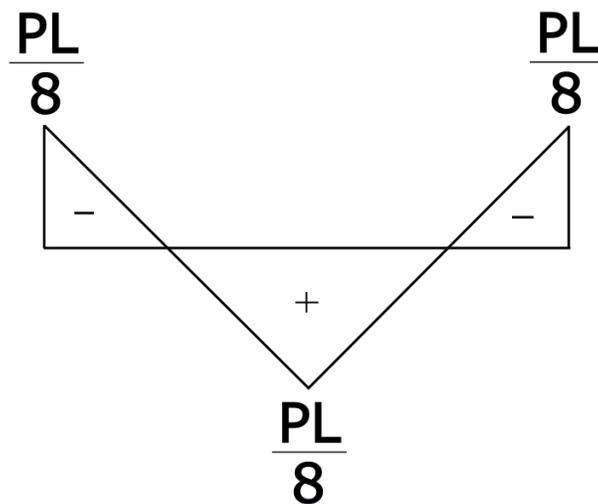


Figura 15: Diagrama de momento flector para una viga empotrada en sus extremos. (Fuente: elaboración propia).

Se utiliza la siguiente expresión para diseñar la viga de sección rectangular, considerando que el material seleccionado para fabricar el banco de ensayos es acero ASTM A36, con un esfuerzo de fluencia de 250 MPa.

$$\sigma_d \geq \frac{\sigma_y}{F.S} \quad (2)$$

$\sigma_d$  : Esfuerzo de diseño

$\sigma_y$  : Esfuerzo de fluencia del material

$F.S$  : Factor de seguridad

De esta manera, reemplazando los valores en la ecuación 2 se tiene:

$$\sigma_d \geq 125 \text{ MPa} \quad (3)$$

La expresión para determinar el esfuerzo en flexión:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

$M$  : Momento flector

$c$  : distancia al eje neutro de la viga

$I$  : segundo momento de área

El segundo momento de área de la sección rectangular “ $I$ ” y la distancia al eje neutro “ $c$ ” se determinan mediante las ecuaciones 5 y 6, respectivamente:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5)$$

$$c = \frac{h}{2} \quad (6)$$

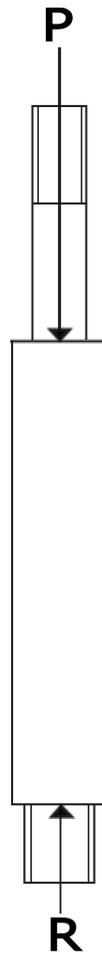
$b$  : ancho de la placa

$h$ : espesor de la placa

Con esto, es posible determinar el espesor de la placa que debe ser de mínimo 15.5 mm. Considerando este valor se selecciona un espesor de 18 mm, puesto que es el formato que se encuentra disponible por el proveedor.

### 4.3.2 Diseño de las columnas

El funcionamiento del sistema consiste en deformar la lámina que en este caso es de PVC, se debe considerar que la profundidad máxima no superará los 100 milímetros según experimentos realizados por distintos investigadores [2,6,9], por lo que se establece que la distancia entre la base y la mordaza inferior sea de 120 milímetros. También se deben incluir los tramos para sujetar las mordazas con la tuerca y la sujeción a la base. Por otro lado, para diseñar la columna se considera la compresión originada por la fuerza vertical máxima y se asume que los extremos se encuentran empotrados.



**Figura 16: Diagrama de cuerpo libre de la columna.**  
(Fuente: elaboración propia)

Lo primero es calcular la longitud equivalente, para esto se utiliza la siguiente expresión:

$$L_e = KL \quad (7)$$

$L_e$  : Longitud real de la columna entre los soportes

$L$  : Longitud de la columna

$K$  : Constante que depende de la fijación de los extremos

Buckled shape of column shown by dashed line						
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value K	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
End condition key		Rotation fixed and translation fixed				
		Rotation free and translation fixed				
		Rotation fixed and translation free				
		Rotation free and translation free				

**Figura 17: Factores de longitud efectiva. (Fuente: [40]).**

En este caso, se el valor de  $K$  se obtiene de la siguiente Figura 17, en donde se presenta un factor  $K$  teórico y uno práctico, según lo recomendado por R. Mott [35] se debe utilizar el valor mayor, por lo que se utiliza 0.65.

$$L_e = 0.65 \cdot 120 [mm] \quad (8)$$

Se debe determinar el radio de giro:

$$r = \sqrt{I/A} \quad (9)$$

$A$  : Área de la sección transversal.

De esta manera, la relación de esbeltez se determina por:

$$\lambda = \frac{L_e}{r} = KL \quad (10)$$

En estos casos se tienen dos métodos para analizar las columnas: 1) la fórmula de Euler para columnas largas y esbeltas y 2) la fórmula de J. B. Johnson para columnas cortas [35]. La elección del método apropiado depende del valor de la esbeltez real de la columna comparado con la relación de esbeltez de transición, o constante de columna  $C_c$ , que está definida de la siguiente manera:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (11)$$

$E$  : Modulo de elasticidad del material.

$S_y$  : Esfuerzo de fluencia del material.

En este caso se tiene que la relación de esbeltez  $\lambda$  es menor que  $C_c$ , por lo que la columna es corta y se emplea la formula de J. B. Johnson para determinar el diámetro mínimo.

$$P_{cr} = AS_y \left[ 1 - \frac{S_y \left( \frac{4KL}{D^2} \right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (12)$$

Se espera que la falla sea con una carga límite por lo que se establece un factor diseño de 2 a la carga admisible:

$$P_a = P_{cr}/N \quad (13)$$

$P_c$ : carga crítica.

$P_a$  : carga admisible.

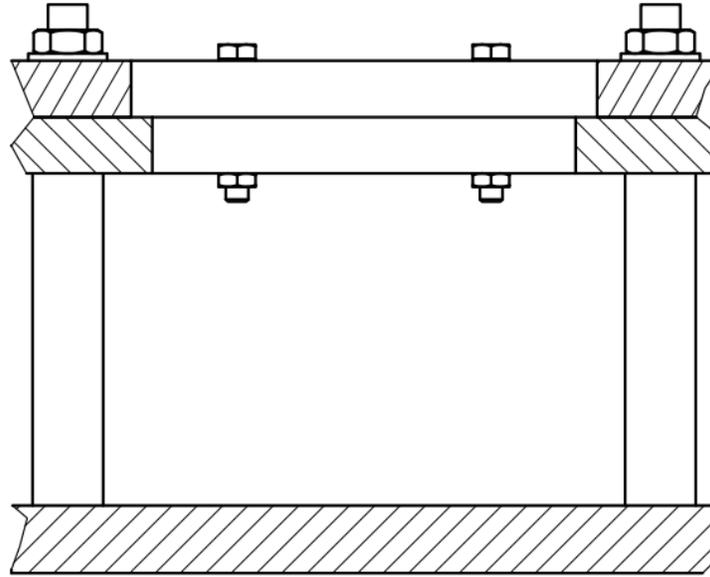
$N$  : factor de diseño.

Finalmente, reemplazando los valores en las ecuaciones se obtiene que el diámetro mínimo de la columna es de 8.9 mm. Sin embargo, para el banco de ensayos se considera un diámetro de 25 mm, debido al tipo de anclaje a la base y sujeción de las mordazas.

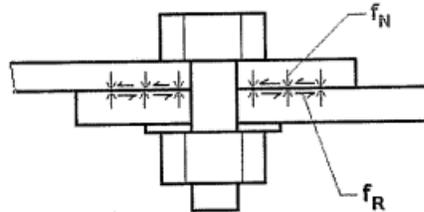
### 4.3.3 Cálculo de los pernos

Para sujetar la lámina a conformar mediante las mordazas inferior y superior, se plantea el uso de pernos como se aprecia en la Figura 18. Es importante que la configuración de pernos seleccionada resista las fuerzas involucradas en el proceso, en donde la principal viene a ser la fuerza en la dirección vertical. Se establece que el juego para cada una de las cuatro componentes de la mordaza se componga de dos pernos. Para verificar esta configuración se recurre a Diseño en ingeniería mecánica de Shigley [36], en donde se desarrolla un procedimiento que consiste en calcular distintos factores de seguridad para corroborar el correcto diseño del juego.

Lo primero a considerar son las fuerzas que debe resistir el perno, en la Figura 19 se presentan las fuerzas que debe soportar el perno considerando el efecto de la herramienta cerca de las mordazas.



**Figura 18: Sistema de sujeción mordazas. (Fuente: elaboración propia).**



**Figura 19: Fuerza normal y de fricción sobre el perno [39].**

En este caso la fuerza a considerar es la de tracción, que es igual a la normal  $f_n$ . Se establece la carga  $P_t$  como la total en tracción y la  $P$  como la que debe soportar cada perno, siendo  $N$  el número de pernos.

$$P = P_t N \quad (14)$$

La configuración seleccionada consiste en utilizar dos pernos M8 de 40 mm de largo, grado 5. La rigidez de los pernos se determina con la ecuación 15 y la rigidez de los otros elementos como las mordazas y la arandela se determinan con la ecuación 16.

$$k_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (15)$$

$k_b$ : rigidez efectiva estimada del perno

$A_t$ : área de esfuerzo sometida a tensión

$l_t$ : longitud de la parte roscada de agarre

$E$ : módulo de Young

$A_d$ : área del diámetro mayor del sujetador

$l_d$ : longitud de la parte si rosca de agarre

$$k_m = \frac{0.5774\pi Ed}{2 \ln \left( 5 \frac{0.5774l + 0.5d}{0.5774l + 2.5d} \right)} \quad (16)$$

$k_m$ : rigidez de los elementos del sujetador

$l$ : espesor de todo el material apretado

$d$ : diámetro del perno

La constante de rigidez de la unión  $C$  se determina mediante la ecuación 17 y la precarga  $F_i$  mediante la ecuación 18. En el caso de la precarga para conexiones no permanentes tiene un valor del 75% de la carga de prueba  $F_p$  [36].

$$C = \frac{k_b}{k_b + K_m} \quad (17)$$

$$F_i = 0.75F_p \quad (18)$$

Con lo anterior, es posible determinar los factores de seguridad a la fluencia estática, de carga de los pernos y contra la separación, los cuales se calculan mediante las ecuaciones 19, 20 y 21 respectivamente.

$$n_p = \frac{S_p A_t}{C \left( \frac{P_t}{N_p} \right) + F_i} \quad (19)$$

$$n_L = \frac{S_p A_t - F_i}{CP} \quad (20)$$

$$n_0 = \frac{F_i}{P(1 - C)} \quad (21)$$

$n_p$ : factor de seguridad por esfuerzo estático

$n_l$ : factor de carga

$n_0$ : factor de seguridad contra la separación de la unión

$S_p$ : resistencia de prueba

Finalmente, se obtiene que el factor de seguridad por esfuerzo estático es de 1.29, el factor de carga es de 11.1 y el factor de seguridad contra la separación de la unión es de 9. Por lo tanto, los pernos seleccionados garantizan un buen funcionamiento de la junta en tracción.

#### 4.3.4 Diseño y cálculo de herramienta

El punzón es la herramienta encargada de deformar la lámina siguiendo la trayectoria definida por medio de control numérico. En su recorrido se somete a fuerzas en distintas direcciones, además se encuentra en rotación constante por lo que debe soportar cargas dinámicas.

La herramienta debe soportar fuerzas considerables dependiendo del material a conformar, por lo que se elige el acero AISI 1045 para su fabricación debido a la alta resistencia que presenta. La Figura 20 presenta las cargas a las que se somete la herramienta, el estado es similar al de una viga empotrada con carga puntual en su extremo y una carga de compresión. El cálculo del diámetro mínimo para soportar la compresión de 2100 N se realizó en el capítulo 4.3.2, por lo que en este caso se evalúa el efecto de la fuerza perpendicular, la cual genera flexión en la herramienta.



Figura 20: Diagrama de cuerpo libre de la herramienta

La fuerza  $F_n$  genera la compresión y la fuerza  $F_c$  genera la flexión de la herramienta. Esta última se obtiene de simulaciones del proceso, en donde alcanzó un máximo de 287 N.

Se utiliza la siguiente expresión para diseñar la herramienta de sección circular, considerando que el material seleccionado para fabricar el banco de ensayos es acero AISI 1045, con un esfuerzo de fluencia de 310 MPa.

$$\sigma_d \geq \frac{\sigma_y}{F \cdot S} \quad (22)$$

El esfuerzo de flexión para sección circular es:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (23)$$

El momento de inercia para la sección circular es:

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad (24)$$

El parámetro  $c$  es igual a la mitad del diámetro, por lo tanto, la expresión para determinar el diámetro mínimo es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M \cdot F \cdot S}{\pi \cdot \sigma_y}} \quad (25)$$

Finalmente, se obtiene que el diámetro mínimo de la herramienta para el estado de fuerza estática es de 9.05 mm.

Por otro lado, se contempla el diseño de fatiga de la herramienta considerando que la carga se alternará debido a la rotación. Se calcula el diámetro mínimo utilizando la teoría de fatiga para ejes sometidos a flexión pura, para esto se hace uso del criterio de falla de Gerber [36].

$$d = \left( \frac{8NA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[ 1 + \left( \frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

Donde los parámetros A y B corresponden a:

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_f T_a)^2} \quad (27)$$

$$B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2} \quad (28)$$

$N$ : factor de seguridad

$S_e$ : resistencia a la fatiga modificada

$S_{ut}$ : resistencia última a la tensión

$K_f$ : factor de concentración de esfuerzo a la fatiga por flexión

$K_{fs}$ : factor de concentración de esfuerzo a la fatiga por torsión

$M_a$ : momento flector alterno sobre el eje

$M_m$ : momento flector medio sobre el eje

$T_a$ : torque alterno sobre el eje

$T_m$ : torque medio sobre el eje

El criterio de falla se puede usar para ejes que están sometidos a cargas de flexión y torsión, por separado o combinados. En este caso se considera que la herramienta trabaja en flexión pura, por lo que se eliminan los términos  $T_a$  y  $T_m$  asociados a la torsión. Además, el momento medio  $M_m$  es cero ya que el eje rota a una velocidad constante y el término  $K_f$  es igual a 1 debido a la ausencia de concentradores de esfuerzo. Por lo tanto, la expresión final para determinar el diámetro mínimo es:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_a \cdot N}{\pi \cdot S_e}} \quad (29)$$

Donde,  $S_e$  es la resistencia a la fatiga modificada que se determina por:

$$S_e = C_a C_b C_c C_e S'_e \quad (30)$$

$C_a$ : factor de condición superficial

$C_b$ : factor de tamaño

$C_c$ : factor de carga

$C_e$ : factor de confiabilidad

$S'_e$ : resistencia a la fatiga

Estos parámetros son los que modifican la resistencia a la fatiga o límites de resistencia de la pieza, se denominan factores de corrección de Marín y buscan corregir el valor teórico para aplicaciones específicas.

Se establece un factor de seguridad  $N$  de 1.5 para determinar el diámetro de la herramienta. El factor de condición superficial  $C_a$  corresponde al de un acabado maquinado y tiene un valor de 0.84, el factor de tamaño  $C_b$  se determina en base al diámetro con un valor de 0.97, el factor de carga  $C_c$  es 1 debido a que se trabaja solo la flexión y el factor de confiabilidad  $C_e$  para una confiabilidad del 99% corresponde a 0.814. El acero AISI 1045 tiene un esfuerzo de fluencia de 310 MPa y en esfuerzo máximo a la tensión de 565 MPa, la resistencia a la fatiga corresponde a la mitad de este último, por lo que  $S'_e$  es 282.5 MPa. Las tablas para determinar cada factor se encuentran en Anexos A.

Finalmente, resolviendo estas ecuaciones se obtiene que el diámetro mínimo de la herramienta debe ser de 11.2 mm. Por lo tanto, considerando estos resultados se establece que el diámetro del punzón con punta semiesférica será de 12 mm y el largo de 100 mm.

#### 4.4 Cotización de componentes del banco

En la Tabla 4 se presentan los costos de los materiales seleccionados para la fabricación de los componentes de banco. El proveedor de los materiales es la empresa Aceros Otero.

**Tabla 4: Resumen costo de materiales.**

<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>Costo total (CLP)</b>
1	Base	Plancha de acero ASTM A36 250x250x24 mm	17.450 + IVA
1	Columna	Barra de acero AISI 1020 1 m de longitud y diámetro 1''	6.840 + IVA
1	Mordaza inferior	Plancha de acero ASTM A36 250x250x18 mm	12.915 + IVA
1	Mordaza superior	Plancha de acero ASTM A36 250x250x18 mm	12.915 + IVA
<b>Subtotal</b>			<b>59.642</b>

En la Tabla 5 se presentan los costos asociados a los elementos de sujeción del banco de ensayos. El proveedor de los elementos es la empresa Milan Fabjanović.

**Tabla 5: Resumen costos elementos de sujeción.**

<b>Cantidad</b>	<b>Elemento</b>	<b>Costo (CLP)</b>
8	Pernos M8x40x1.25 mm	410
8	Tuerca hexagonal M8-1.25	57
4	Tuerza hexagonal M14-2	233
4	Tuerza hexagonal M18-2.5	326
<b>Subtotal</b>		<b>5.972</b>

Por lo tanto, el costo total de los materiales necesarios para la fabricación del banco de ensayos asciende a los 65.614 CLP.

## 4.5 Cotización de lámina de PVC

En la Tabla 6 se presentan los costos de la lámina de PVC disponible en sus distintos formatos. El proveedor de las láminas de PVC es la empresa Plastigen.

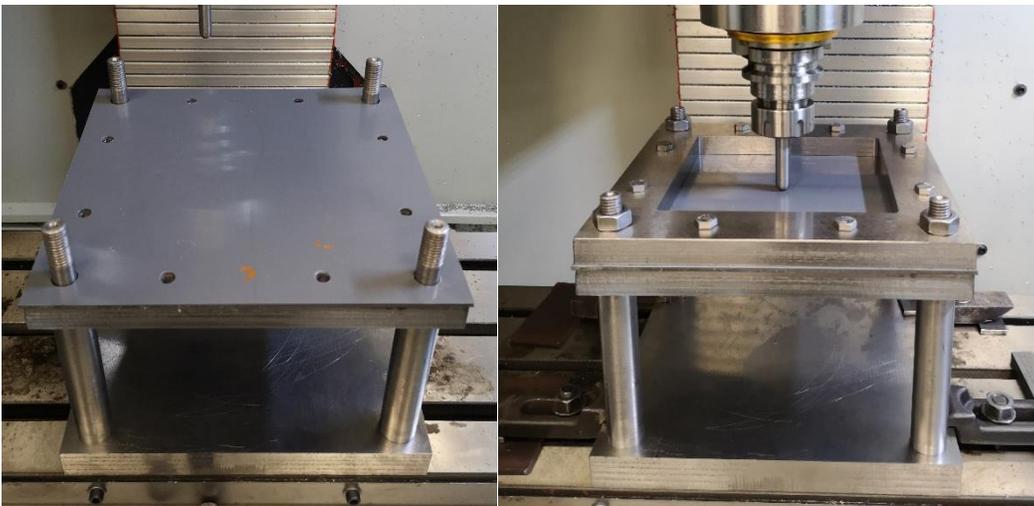
**Tabla 6: Formatos y costos de láminas de PVC disponibles por Plastigen.**

<b>Formato de lámina de PVC</b>	<b>Costo (CLP)</b>
1x250x250 mm	2.200 + IVA
3x250x250 mm	2.708 + IVA
3x500x500 mm	11.075 + IVA
4x250x250 mm	4.718 + IVA

Para este trabajo se requiere que la lámina sea de dimensión de 250x250 mm, puesto que corresponde al área máxima de trabajo del banco de ensayos. Por lo tanto, se selecciona la opción de 3x250x250 mm y se adquieren 13 unidades para realizar los ensayos.

## 4.6 Implementación del banco de ensayos

Una vez ensamblados los distintos componentes del banco de ensayos, este es montado mediante abrazaderas sobre la mesa de trabajo de la máquina CNC modelo XH7126 del centro de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica, ver Figura 21. A su vez, el punzón de 12 mm de diámetro se instala en el portaherramientas BT40.



**Figura 21: Banco de ensayos montado en CNC.**

La lámina de PVC a conformar se ubica en entre las mordazas inferior y superior para restringir el movimiento durante el proceso. Las mordazas se sujetan mediante ocho pernos y las cuatro columnas,

con sus respectivas tuercas. Las láminas deben tener una dimensión máxima de 250x250 mm y el área de trabajo es de 150x150 mm.

La mordaza superior se diseñó de tal manera que permita disponer de mayor espacio para maniobrar la herramienta de conformado, por lo que su superficie de vaciado es mayor. La mordaza inferior, al funcionar como apoyo, genera zonas de concentración de esfuerzos en los bordes que están en contacto con la lámina durante el conformado, por lo que se realiza un empalme de 4 mm de radio.



**Figura 22: Configuración de mordazas y lámina.**

## Capítulo 5: Ensayos y fabricación de prototipos

El test de línea consiste en una prueba básica mediante la cual se generan una serie de desplazamientos lineales de la herramienta sobre la lámina, incrementando la profundidad con cada pasada. Con esta herramienta es posible analizar los límites de conformado de la lámina y cómo afectan los distintos parámetros operacionales en la geometría final. En esta instancia, se estudian los efectos de la velocidad de rotación y velocidad de avance de la herramienta. Por otro lado, se comparan los límites de conformado y la forma final de los ensayos.

Se realizan pruebas con diferentes incrementos verticales  $\Delta h$ , en específico 0.2, 0.5 y 0.7 mm, obteniendo como resultado que este parámetro no influye en la conformabilidad de la lámina dentro de este rango. Un incremento vertical pequeño requiere más tiempo para conformar la lámina, pero la calidad superficial es mejor. Por lo tanto, con la finalidad de realizar un proceso rápido y manteniendo la buena calidad superficial, es que para las siguientes aplicaciones se utiliza un incremento de 0.5 mm. Por otro lado, la velocidad de penetración presenta una influencia mayor en los ciclos finales antes de la falla. Mediante pruebas preliminares se determina que, para velocidades mayores de penetración la falla dúctil se presenta a menores profundidades de trabajo, es decir, disminuye la capacidad de deformar el material.

### 5.1 Test de línea

Para realizar el test de línea primero se debe diseñar la geometría en el software CAD Inventor, para luego generar el proceso de mecanizado en el software CAM Mastercam, el cual se utiliza el centro de mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica. El proceso seleccionado corresponde a una línea de flujo en una dirección, lo que implica que, cada pasada de la herramienta comienza en el mismo punto. En la Figura 23, el trayecto en amarillo corresponde a la retracción de la herramienta y el trayecto en rojo a cada pasada.

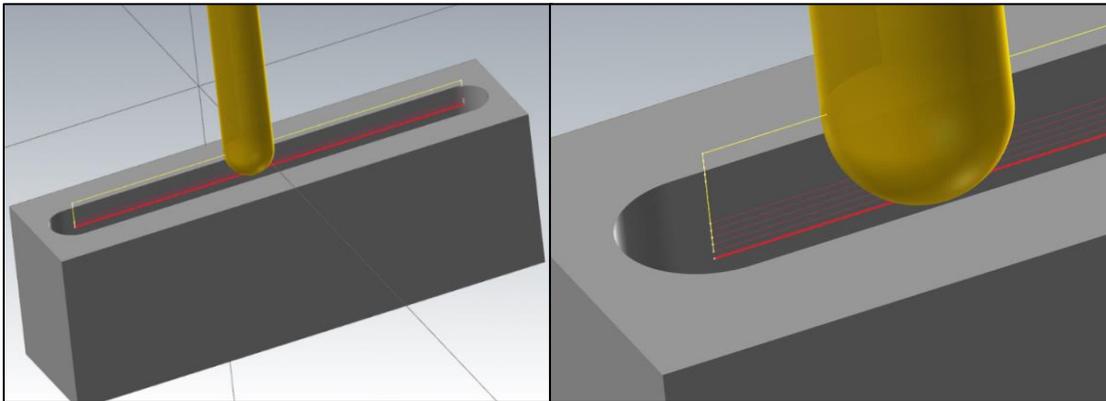
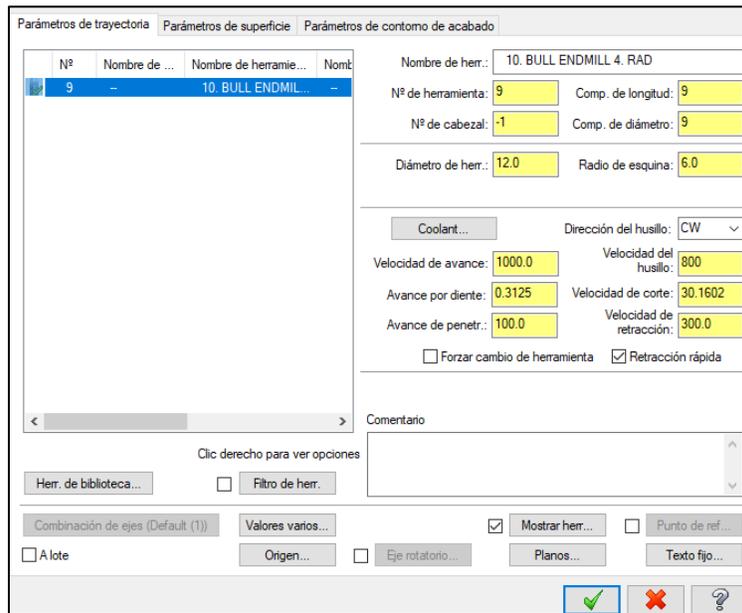


Figura 23: Trayectoria de test de línea definida en Mastercam.

La lámina de PVC tiene una dimensión de 250x250 mm y el área de trabajo efectivo es de 150x150 mm, bajo estas condiciones se establece en 110 mm el largo de la línea.

La interfaz para modificar los parámetros operacionales se muestra en la Figura 24. Para este trabajo se crea el módulo de la nueva herramienta con sus respectivas dimensiones. Para los ensayos se mantiene la velocidad de penetración en 100 mm/min y la velocidad de retracción en 300 mm/min.



**Figura 24: Interfaz de parámetros operacionales en Mastercam.**

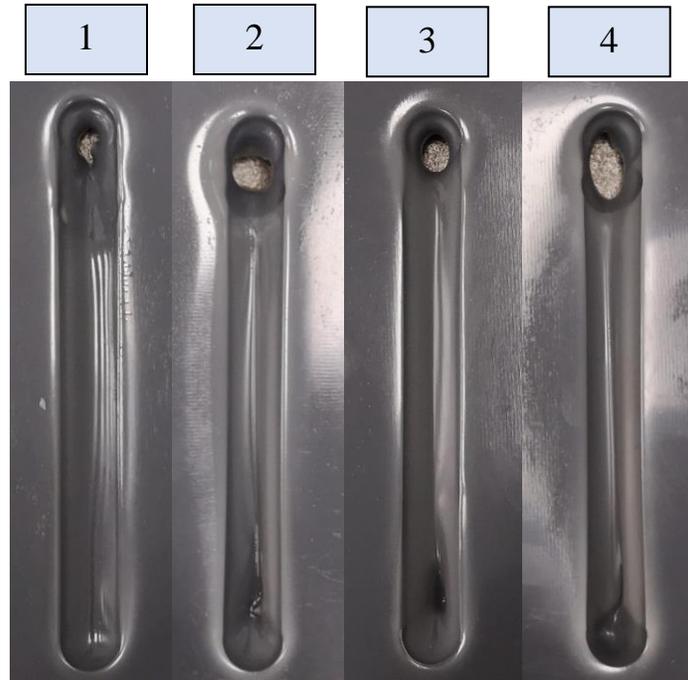
## 5.2 Velocidad de avance

Por lo general, la velocidad de avance para el SPIF se encuentra en un rango de 600 a 4000 mm/min [10]. Sin embargo, para aplicaciones de polímeros no se supera los 3000 mm/min. En este caso, se establece un rango entre 500 y 2000 mm/min para conformar el PVC. Para los siguientes ensayos se establece una velocidad de rotación de 800 RPM.

**Tabla 7: Ensayos a distintas velocidades de avance.**

Ensayo	Velocidad de avance [mm/min]
1	500
2	1000
3	1500
4	2000

La metodología consiste en realizar la secuencia de líneas incrementando la profundidad hasta que se produzca la falla en la lámina. Se registra esta profundidad máxima y se mide la profundidad final una vez retirada la lámina del banco de ensayos. En la Figura 25 se presentan las pruebas de línea luego de alcanzar la falla.



**Figura 25: Resultados de prueba de línea ensayos 1, 2, 3 y 4.**

### 5.3 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación del punzón utilizada por investigadores en general no supera los 2500 RPM en aplicaciones de polímeros en el ISF [10], por lo tanto, se establecen cuatro niveles dentro de este rango. Además, la velocidad de avance para cada ensayo se mantiene fija en 1000 mm/min.

**Tabla 8: Ensayos a distintas velocidades de rotación.**

Ensayo	Velocidad de rotación [RPM]
5	200
6	800
7	1400
8	2000

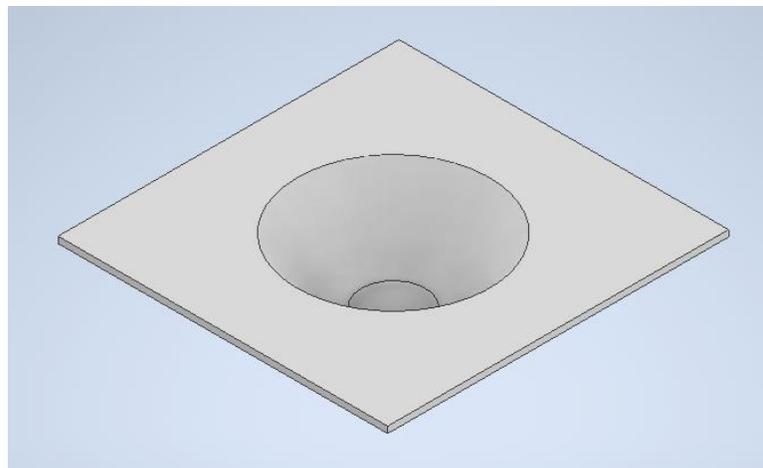
Se aplica la misma metodología que en el capítulo anterior para registrar y medir las profundidades máxima y final. Los resultados una vez alcanzada la falla se presentan en la Figura 26.



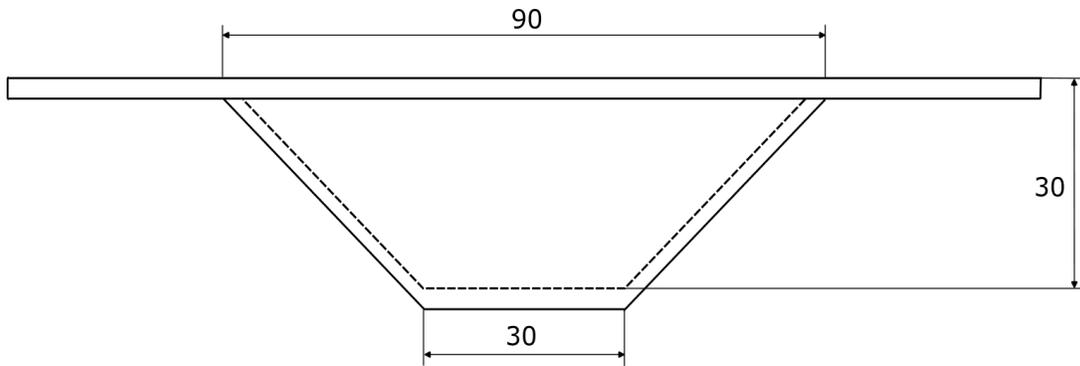
**Figura 26: Resultados ensayos 5, 6, 7 y 8.**

#### **5.4 Fabricación de prototipos**

Con la finalidad de conocer la capacidad del SPIF de generar geometrías con altas deformaciones, se generan dos prototipos que se han utilizados para investigaciones de las distintas variables del ISF. Los modelos son un cono y una pirámide truncados. La primera geometría para fabricar corresponde al cono truncado presentado en el modelo CAD de la Figura 27 y las dimensiones se muestran en la Figura 28.

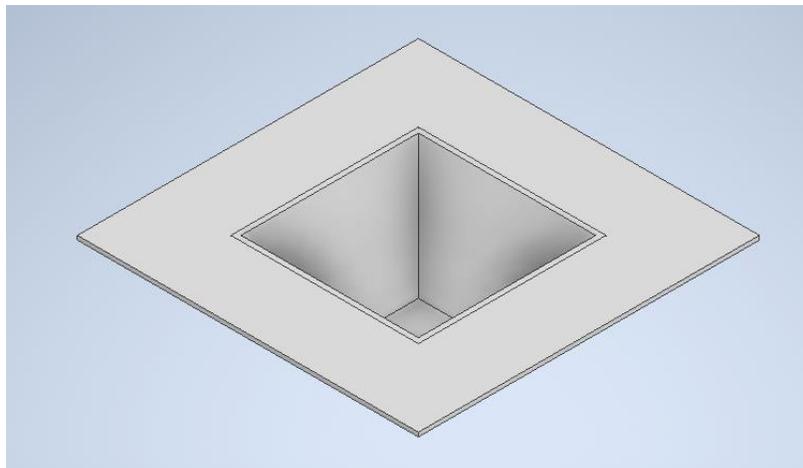


**Figura 27: Modelo CAD de tronco de cono.**

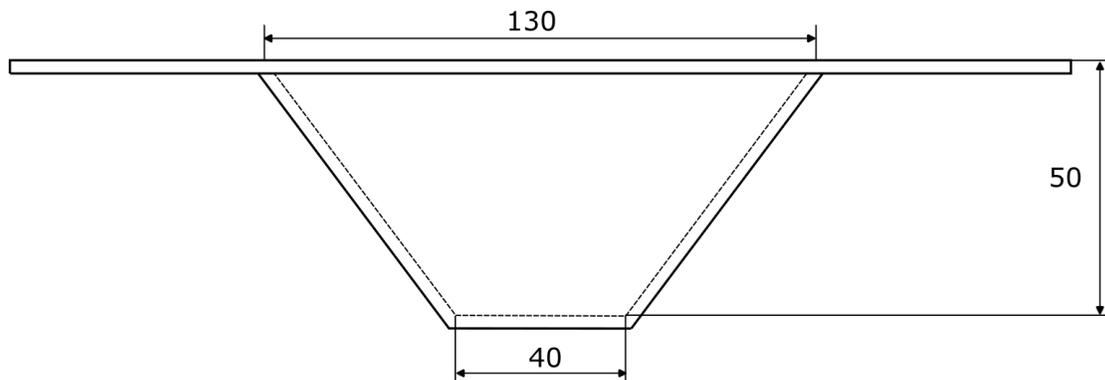


**Figura 28: Dimensiones como truncado en mm.**

La segunda geometría por fabricar es la pirámide truncada, su modelo CAD se presenta en una Figura 29 y las dimensiones en la Figura 30. Las trayectorias para ambas geometrías se definen como un proceso de contorneado mediante Mastercam, ver Figura 31.



**Figura 29: Modelo CAD de pirámide truncada.**

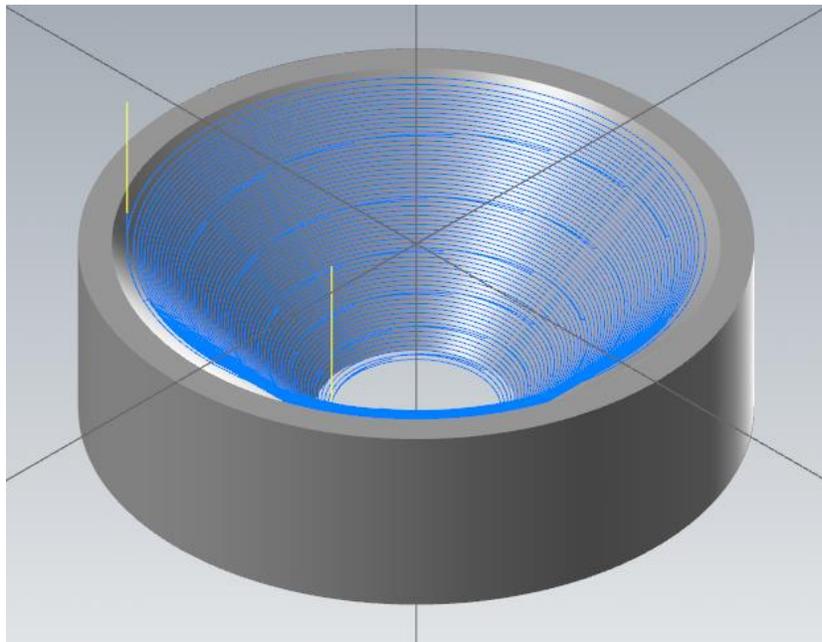


**Figura 30: Dimensiones de la pirámide truncada.**

Los parámetros operacionales para la fabricación de ambos modelos se establecen considerando ensayos preliminares y los resultados obtenidos de las pruebas de líneas, ver Tabla 9.

**Tabla 9: Parámetros operacionales para fabricación de prototipos.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Velocidad de avance	1000 mm/min
Velocidad de rotación herramienta	800 RPM
Velocidad de penetración	100 mm/min
Velocidad de retracción	300 mm/min
Incremento vertical	0.5 mm

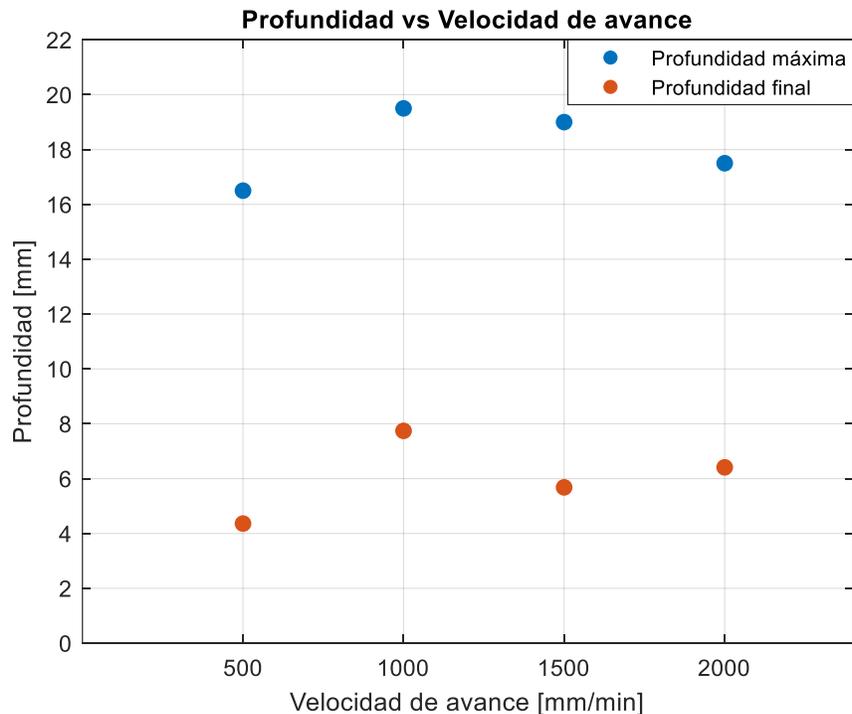


**Figura 31: Trayectoria de la herramienta definida en Mastercam.**

## Capítulo 6: Resultados

### 6.1 Influencia de la velocidad de avance y de rotación

A continuación, se grafican las profundidades máximas alcanzadas durante el proceso de conformado, estas se registran antes de la falla dúctil. Se incluyen las profundidades finales correspondientes a las que se miden una vez retirada la lámina del banco de ensayos.

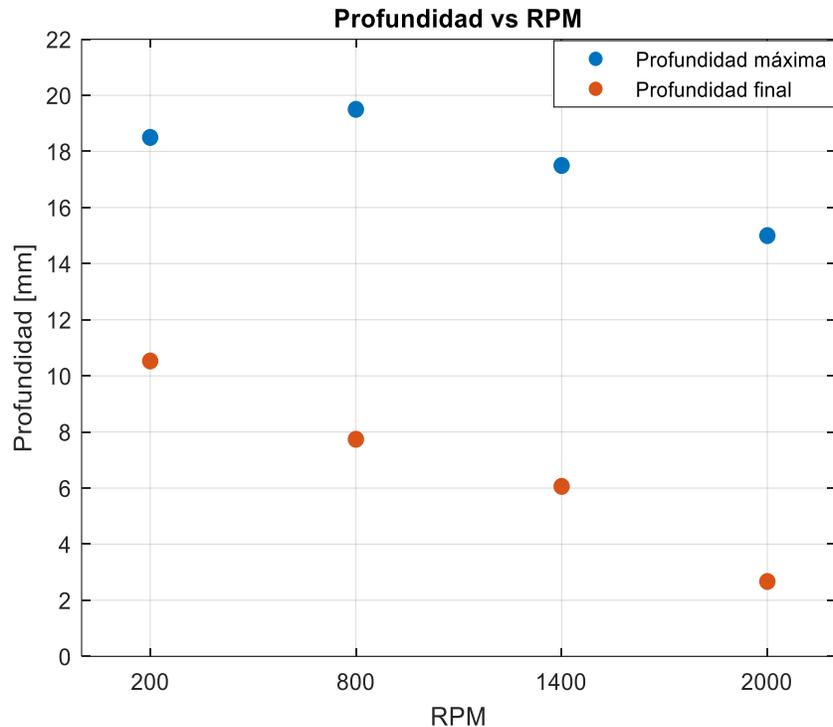


**Figura 32: Profundidad máxima y final para distintas velocidades de avance, con velocidad de rotación de 800 RPM.**

Se determina la contracción sufrida por la lámina en cada ensayo, lo que viene a ser el cambio elástico de la lámina deformada una vez se retira la fuerza de conformado. En la Tabla 10 se presentan los porcentajes de recuperación para la variación de velocidad de avance, se destaca la configuración del ensayo 2 como la que produce la menor contracción.

**Tabla 10: Recuperación registrada en cada ensayo.**

Ensayo	Recuperación
1	73%
2	60%
3	67%
4	64%



**Figura 33: Profundidad máxima y mínima para distintas velocidades de rotación, con velocidad de avance de 1000 mm/min.**

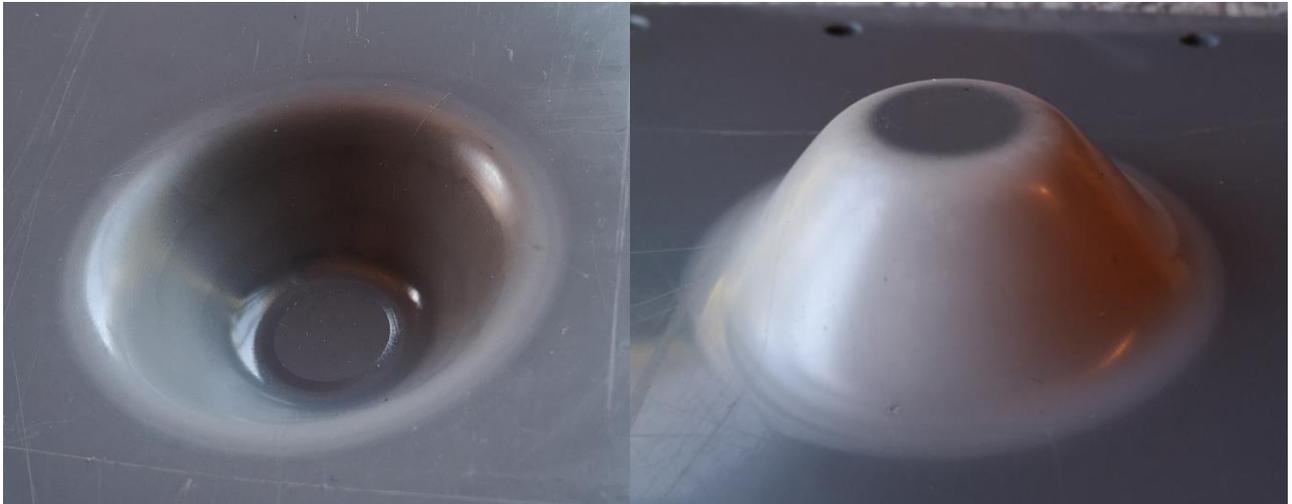
En la Tabla 11 se presentan los porcentajes de recuperación para la variación de velocidad de rotación. Se demuestra que para velocidades de rotación mayores aumenta la recuperación.

**Tabla 11: Porcentaje de recuperación para cada ensayo.**

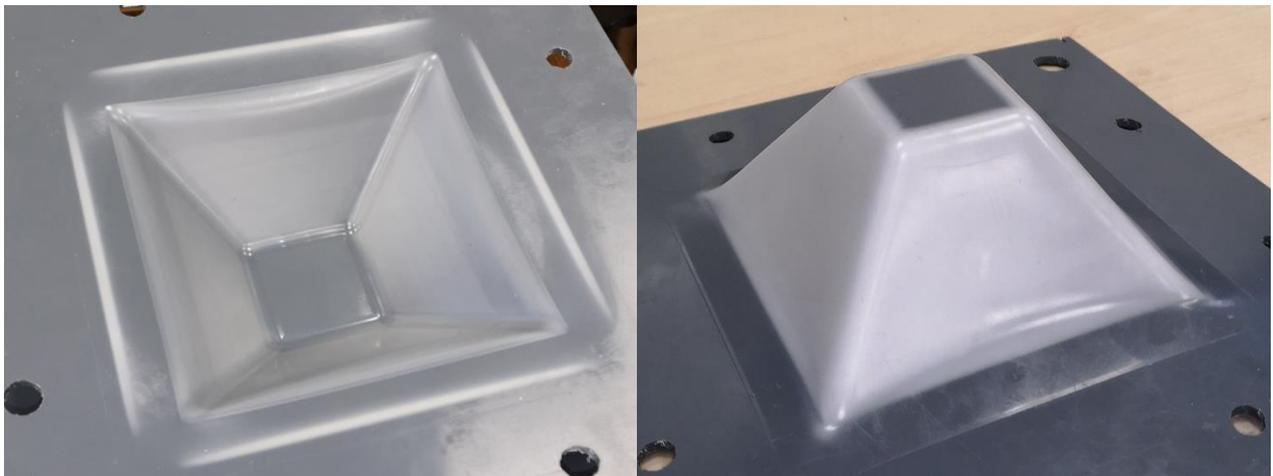
Ensayo	Recuperación
5	43%
6	55%
7	60%
8	82%

## 6.2 Fabricación prototipos

A continuación, en las Figura 33 y 34 se presentan los resultados obtenido de la fabricación de la pirámide y cono truncados mediante SPIF. Además, se mide el espesor de la geometría resultante en distintas zonas de la pirámide truncada y se escanea la superficie mediante un scanner de marca Hexagon modelo Absolute Arm, disponible en el laboratorio de fabricación del departamento de Ingeniería Mecánica. Con esto, se compara el contorno que resulta del SPIF con el modelo CAD ingresado a Mastercam, ver Figura 37.



**Figura 35: Tronco de cono fabricado mediante SPIF.**



**Figura 34: Pirámide truncada fabricada mediante SPIF.**

Para analizar la influencia del proceso en el espesor de la pirámide, se realiza un corte por la mitad de la geometría. Luego, se demarcan distintas zonas a lo largo del corte (ver Figura 35) y se mide el espesor utilizando un pie de metro. De esta manera, se obtienen las mediciones registradas en la Tabla 12, en donde se agrega el porcentaje de reducción.

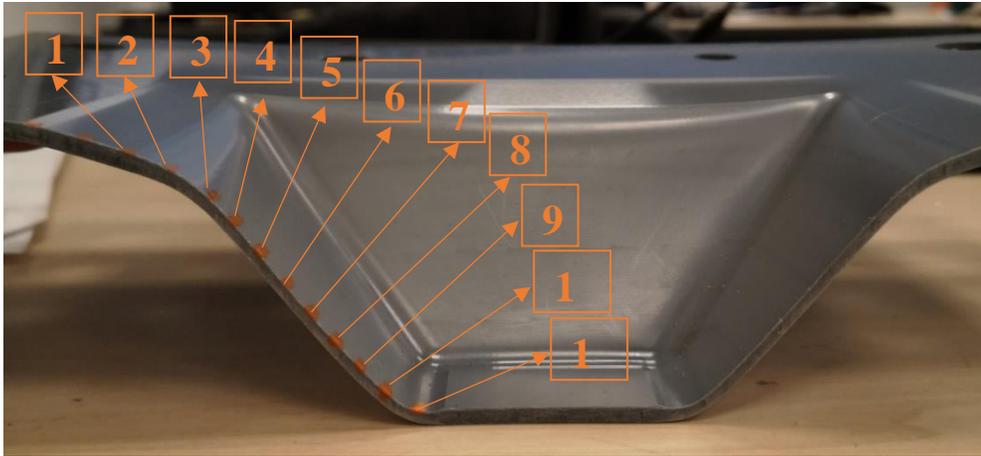


Figura 36: Corte de pirámide truncada con demarcación de puntos para medir espesor.

Tabla 12: Espesor en cada punto y porcentaje de reducción.

Punto	Espesor [mm]	Porcentaje de reducción
1	3.08	0%
2	2.89	6%
3	2.35	23%
4	2.12	31%
5	2.12	31%
6	2.11	31%
7	2.11	31%
8	2.21	28%
9	2.18	29%
10	2.18	29%
11	2.45	20%

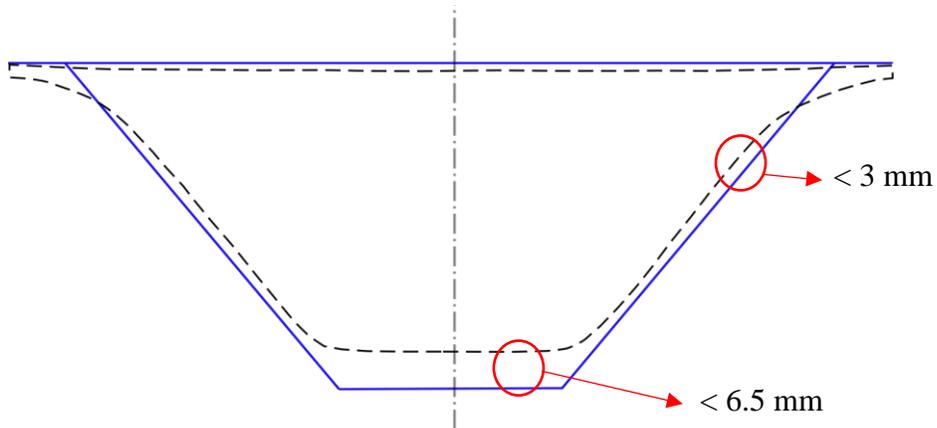


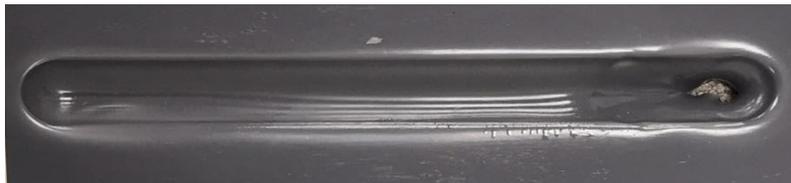
Figura 37: Comparación contorno del modelo CAD con scanner del prototipo fabricado.

## Capítulo 7: Discusión de resultados

### 7.1 Velocidad de avance

Los resultados presentados en el gráfico de la Figura 32 muestran que se alcanzan mayores profundidades de conformado con velocidades cercanas a 1000 mm/min, para este caso se alcanzaron los 19.5 mm. Para velocidades de hasta 1500 mm/min, se aprecia una leve disminución de la profundidad máxima de solo 0.5 mm, algo que se puede considerar como buen resultado, sin embargo, al medir la profundidad final se evidencia un mayor porcentaje de recuperación, lo que indica una menor precisión geométrica de la forma final.

Para velocidades cercanas a 500 mm/min se alcanza una profundidad de 16.5 mm, siendo la mínima obtenida durante los ensayos. La principal causa viene a ser el aumento de la temperatura debido al prolongado tiempo de contacto entre la herramienta y la zona deformada. Además, en esta configuración se tiene el mayor porcentaje de recuperación, siendo de un 73%. Por último, la forma final presentó zonas con derretimiento y desprendimiento del material, lo que implica obtener un acabado superficial de baja calidad.



**Figura 38: Forma final ensayo con velocidad de avance de 500 mm/min y rotación de 800 RPM.**

Si bien los mejores resultados de conformabilidad se obtienen con la configuración con velocidad de avance de 1000 mm/min, se deben considerar otros factores como, por ejemplo, el tiempo de conformado. Esto porque aumentar a velocidades de 1500 mm/min permite disminuir un tercio del tiempo de trabajo, lo que sería beneficioso en aplicaciones específicas en donde no se requiere la mayor precisión geométrica.

### 7.2 Velocidad de rotación

La mayor profundidad es de 19.5 mm y se logra con una velocidad de rotación de 800 RPM, ver Figura 31. La segunda mayor profundidad se presenta a 200 RPM, llegando a 18.5 mm, sin embargo, para altas velocidades la profundidad no supera los 17.5 mm, registrando una gran disminución en los 2000 RPM, debido a que se logran solo 15 mm.

La principal conclusión sería que, en rangos de bajas velocidades de rotación la conformabilidad y la precisión geométrica mejoran debido a la baja contracción, por lo que es recomendable trabajar bajo estas condiciones. Sin embargo, la forma final del ensayo a 200 RPM contradice esta aseveración. Esto porque se aprecia una forma de arco a lo largo del contorno, que difiere del diseño inicial a conformar. La medición del ancho registra una disminución de hasta el 19% en el centro, por lo que la precisión geométrica de esta configuración es muy baja.



**Figura 39: Forma final ensayo con velocidad de avance de 1000 mm/min y rotación de 200 RPM.**

Por otro lado, al trabajar a velocidades de 2000 RPM se produce el derretimiento de la superficie, lo que implica empeorar el acabado superficial debido al desprendimiento de material. Además, cabe mencionar que debido a la alta velocidad el lubricante salpica fuera del banco de ensayos, por lo que se hace necesario restituirlo de manera continua. Caso contrario en los otros ensayos, en donde al inicio se deposita una cantidad de lubricante con el cual se ejecuta todo el proceso.

Con todo esto, se establece que la velocidad de avance óptima para realizar el proceso de conformado incremental es de 1000 mm/min y la velocidad de rotación de 800 RPM. Sin embargo, con velocidades de avance mayores se tiene la ventaja de reducir el tiempo de fabricación.

### **7.3 Forma final de prototipos**

La fabricación de los modelos de pirámide y cono truncados demuestra que es posible generar geometrías compuestas diferentes ángulos de superficie. La medición de espesores registrada en la Tabla 12, muestra que la reducción máxima que se alcanza durante el proceso es cercana a un tercio del espesor inicial de la lámina. Controlar este parámetro es muy importante para mantener la resistencia del material. Si bien en este caso aún no se presenta una falla, si pudiera aparecer con láminas de espesor más pequeño. En 2010, M. Silva et al [13], ya habían recomendado no conformar láminas de PVC de menos de 2 mm de espesor debido a la temprana aparición de la falla.

Un fenómeno que se repite en ambos modelos es el cambio de apariencia que sufre la lámina conformada, debido a la aparición de zonas blancas resultantes de las altas tensiones. Martins et al [12], explican que este blanqueamiento se produce cuando los polímeros son deformados plásticamente por debajo de la temperatura de transición vítrea, ya que se producen micro huecos en

la matriz polimérica, lo que trae como consecuencia la aparición de fisuras y reducción significativa de la densidad.

Uno de los principales problemas de la aplicación de polímeros en el SPIF es la precisión para alcanzar la forma solicitada. Una de las fuentes de inexactitud es la recuperación elástica al eliminar la carga. Dentro de los polímeros, el PVC destaca por ser uno de los que tiene el menor factor de recuperación elástica. Los resultados presentados en la Figura 37, muestran que la profundidad se contrae aproximadamente 6.5 mm y las paredes cerca de los 3 mm. Si bien esto dista significativamente de las desviaciones típicas de metales, se han propuesto posibles mejoras en la trayectoria [37] e implementación de láminas falsas por debajo de la lámina de trabajo [38]. En general, la desviación geométrica no se aleja más de un 15% del diseño original, lo que podría considerarse bueno para aplicaciones de prototipado rápido que no exigen gran precisión.

## Capítulo 8: Conclusiones

El trabajo desarrollado en este informe tuvo como objetivo diseñar e implementar un banco de ensayos del proceso de fabricación SPIF, con el cual es posible analizar la conformabilidad de diferentes materiales. En este caso, se estudia el PVC en su formato de lámina. Para esto, se realizaron pruebas de línea y se fabricaron dos prototipos, con el propósito de evaluar los límites de deformación y la precisión geométrica de la forma fabricada.

Mediante un modelo de predicción de fuerzas de conformado y la simulación del proceso fue posible establecer las fuerzas de diseño que garantizaran el correcto funcionamiento del banco de ensayos y de la herramienta de conformado.

Del análisis de los ensayos fue posible establecer los parámetros operacionales que aumentan la conformabilidad del PVC en el SPIF. Se presentaron los efectos de la variación de la velocidad de avance y de rotación en la forma de la pieza fabricada.

En general, las bajas velocidades de avance y altas velocidades de rotación presentaron derretimiento de la superficie debido a la alta temperatura. El gran tiempo de contacto y la alta fricción aumentan el calor en la zona deformada, por lo que se deben evitar estos fenómenos. Queda como interrogante un posible rango de temperaturas que mejoraría la conformabilidad de la lámina.

Se demostró la capacidad de generar productos de lámina como lo son la pirámide y cono truncados. Al estudiar su forma final, se observaron reducciones de espesor grandes en comparación a los procesos de conformado convencionales. Sin embargo, los niveles de deformación que alcanza el SPIF son superiores, lo que permite generar mayores deformaciones antes de la falla.

El proceso está orientado a la fabricación de lotes pequeños debido a su largo tiempo de fabricación, sin embargo, tiene una gran flexibilidad a la hora de cambiar aspectos del diseño original sin un mayor costo. Estas condiciones hacen que el SPIF sea una alternativa viable para aplicaciones específicas de baja producción y prototipado rápido.

### 8.1 Trabajos a futuro

En 2022, Manuel, G. [33], definió un modelo FEM del proceso en el cual estableció un parámetro de falla dúctil mediante un criterio de trabajo plástico. Para validar este modelo se requiere replicar sus condiciones de operación en un ensayo. Esto se podría hacer cambiando la geometría de la herramienta.

Si bien quedan establecidas las condiciones óptimas para realizar el proceso, es relevante conocer cómo influye la temperatura en la conformabilidad del PVC y si la implementación de alternativas como el precalentamiento mejoran el proceso.

Se pueden probar nuevas formas para aplicar las trayectorias de la herramienta y evaluar la desviación geométrica de la pieza fabricada. La aplicación de pasadas repetidas podría mejorar la precisión geométrica. Además, un mecanismo que genere compresión al inferior de la lámina permitiría mejorar la conformabilidad y el acabado superficial.

## Referencias

- [1] C. F. Guzmán, «Damage prediction in single point incremental forming using an extended Gurson model,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 151, pp. 45-56, 2018.
- [2] Z. M. R. Maziar Ramezani, «Forming of shallow parts using rubber tools,» *Rubber-Pad Forming Processes*, pp. 65-102, 2012.
- [3] V. Franzen, «Single point incremental forming of PVC,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, n° 1, pp. 462-469, 2009.
- [4] N. Duc-Toan, «Incremental Sheet Metal Forming: Numerical Simulation and Rapid Prototyping Process to make an Automobile White-Body,» *Steel Research International*, vol. 82, n° 7, pp. 795-805, 2011.
- [5] H. R. K. L. G. & N. H. G. Hussain, «Guidelines for Tool-Size Selection for Single-Point Incremental Forming of an Aerospace Alloy,» *Materials and Manufacturing Processes*, pp. 324-329, 2013.
- [6] Z. Cheng, «Incremental sheet forming toward biomedical implants: a review,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, pp. 7225-7251, 2020.
- [7] G. D. N. Ambrogio, «Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing.,» *Journal of materials processing technology*, vol. 162, pp. 156-162, 2005.
- [8] E. Leszak, «Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming». USA Patente US3342051A1, 1967.
- [9] J. Jeswiet, «Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal,» *CIRP Annals*, vol. 54, pp. 88-114, 2005.
- [10] McAnulty, «Formability in single point incremental forming: A comparative analysis of the state of the art,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, pp. 43-54, 2017.
- [11] A. G. & G. L. V. S. Le, «Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials,» *International Journal of Material Forming*, vol. 1, pp. 1179-1182, 2008.
- [12] P. Martins, «Single point incremental forming of polymers,» *CIRP Annals*, vol. 219, pp. 359-364, 2009.
- [13] M. B. Silva, «Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation,» *European Journal of Mechanics - A/Solids*, vol. 29, n° 4, pp. 557-566, 2010.

- [14] M. B. S. & P. A. F. M. Tania A. Marques, «On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 75-86, 2012.
- [15] A. M. & X. Y. Mohammad Ali Davarpanah, «Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 222, pp. 287-300, 2015.
- [16] I. F. M. L. García, «Preliminary study on the use of 3D printed biodegradable polymeric sheet for the manufacturing of medical prostheses by SPIF,» *Procedia CIRP*, vol. 110, pp. 76-81, 2022.
- [17] M. B. Silva, «Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, pp. 73-83, 2008.
- [18] G. Hirt, «Forming strategies and process modeling for CNC incremental sheet forming,» *CIRP Annals*, pp. 203-206, 2004.
- [19] R. S. M. Christopher B. Smith, «Fundamentals of Formability,» *Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability*, pp. 7-9, 2014.
- [20] S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [21] Z. Marciniak, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, London: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] O. Music, «A review of the mechanics of metal spinning,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, n° 1, pp. 3-23, 2010.
- [23] E. Corona, «A simple analysis for bend-stretch forming of aluminum extrusions,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, n° 3, pp. 433-448, 2004.
- [24] Y. Kumar, «Design and Development of Single Point Incremental Sheet Forming Machine,» *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, 2014.
- [25] M. M. A. Weining Li, «Heat-assisted incremental sheet forming for high-strength materials — a review».
- [26] M. H. H. w. G. Hussain, «Advances on Incremental forming of composite materials,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 79, pp. 308-336, 2023.
- [27] J. Jeswiet, «Single Point Incremental Forming and the Forming criteria for AA3003,» *CIRP Annals*, vol. 54, pp. 241-244, 2006.

- [28] R. Sousa, «Incremental Sheet Forming Technologies,» *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [29] G. C. I. Bagudanch, «Forming Force in Single Point Incremental Forming under Different Bending Conditions,» *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 354-360, 2013.
- [30] R. Aerens, «Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, pp. 969-982, 2010.
- [31] Behera, «Single point incremental forming: An assement of the progress and technology trends from 2005 to 2015,» *Journal of Manufacturing Process*, vol. 27, pp. 37-62, 2017.
- [32] T. Luis, «ANÁLISIS NUMÉRICO DEL USO DE LÁMINAS DE PVC EN EL PROCESO,» Universidad de Concepción, Concepción, 2023.
- [33] M. G., «CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PLANCHAS DE PVC ESPUMADO,» Universidad de Concepción, Concepción, 2022.
- [34] R. L. Norton, *Diseño de máquinas*, Pearson Educación, 2011.
- [35] R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas*, PEARSON EDUCATION, 2006.
- [36] R. G. B. y. J. K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Mc Graw Hill Educación, 2012.
- [37] T. Trzepiecinski, «Emerging Trends in Single Point Incremental Sheet Forming of Lightweight Metals,» *Materials Engineering*, vol. 11, n° 8, p. 1188, 2021.
- [38] V. Sisodia, «Influence of process parameters on surface roughness in single point incremental forming using dummy sheet,» *Materials Science and Engineering*, 2018.
- [39] A. Verdugo, «Concepciones apernadas,» Instituto Chileno del Acero, Santiago, 2008.
- [40] «SkyCiv,» 21 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://skyciv.com/es/docs/tutorials/reinforced-concrete-tutorials/column-buckling/>. [Último acceso: 15 10 2023].
- [41] «AXXECOL S.A.,» [En línea]. Available: <http://www.axxecol.com/>. [Último acceso: 25 11 2023].

## Anexos A: Factores para cálculo de herramienta

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{utr}$ kpsi	$S_{utr}$ MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura A.1: factor de acabado superficial.

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Figura A.2: factor de tamaño.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Figura A.3: factor de carga.

Confiabilidad, %	Variación de transformación $z_\alpha$	Factor de confiabilidad $k_e$
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura A.4: factor de confiabilidad.

ACERO AISI / SEA 1045	
Dureza	163 HBRINELL
Esfuerzo de Fluencia	310 Mpa
Esfuerzo Máximo	565 Mpa
Elongación	16% en 50 mm
Reducción de Área	40%
Densidad	7,85 g/ cm <sup>3</sup>

Figura A.2: propiedades del acero AISI 1045. (Fuente: [41]).

## Anexos B: Planos del banco de ensayos

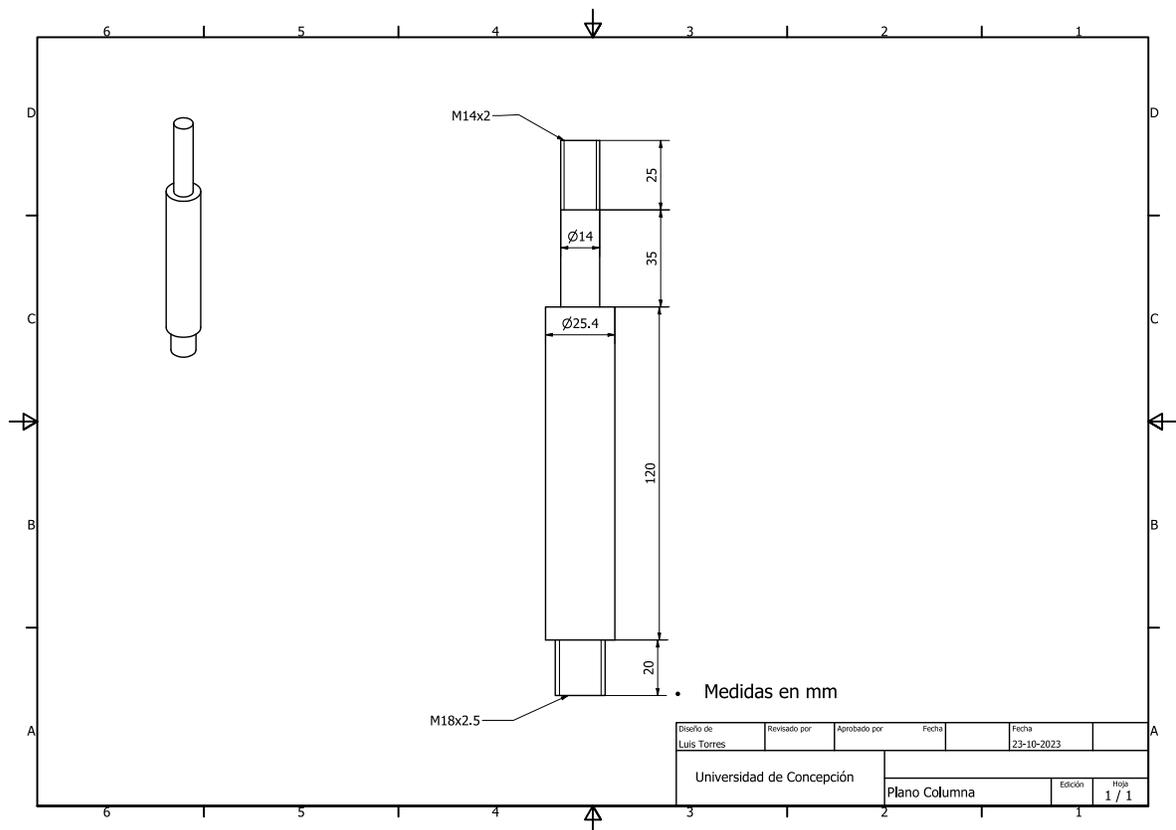


Figura B.1: plano columna.

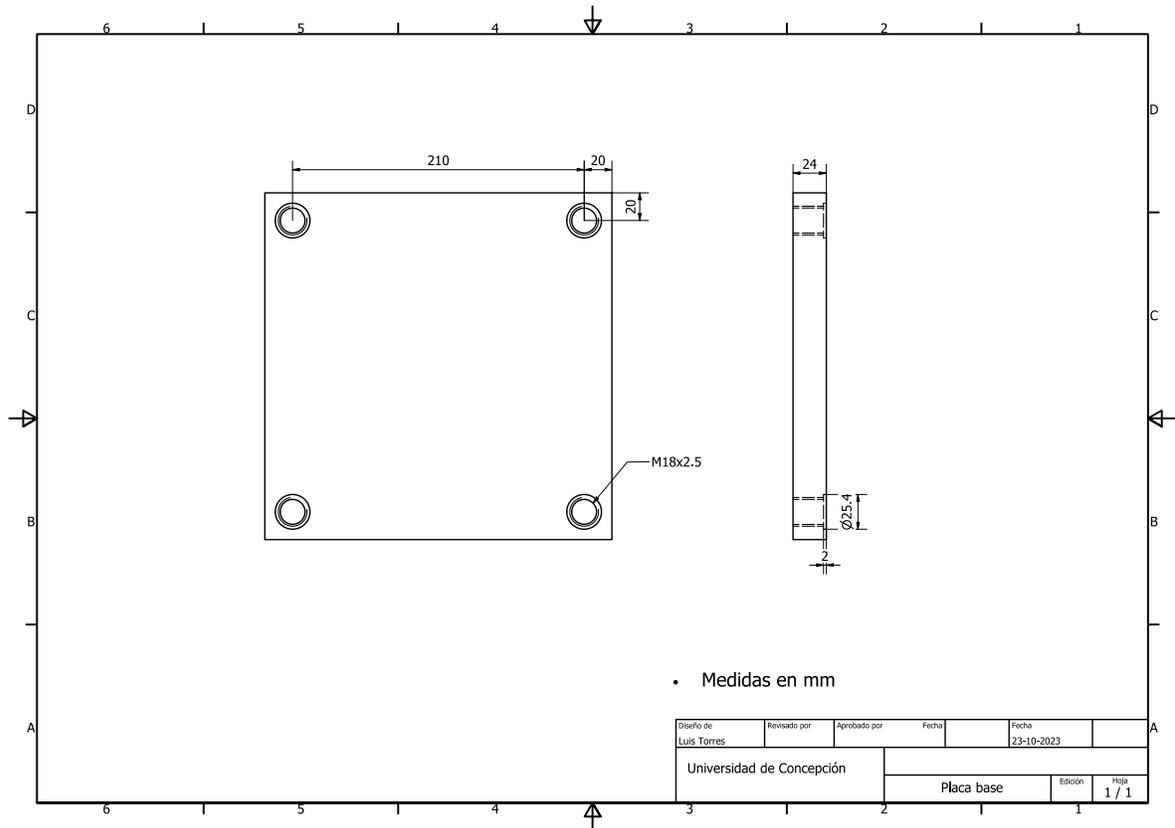


Figura B.2: plano placa base.

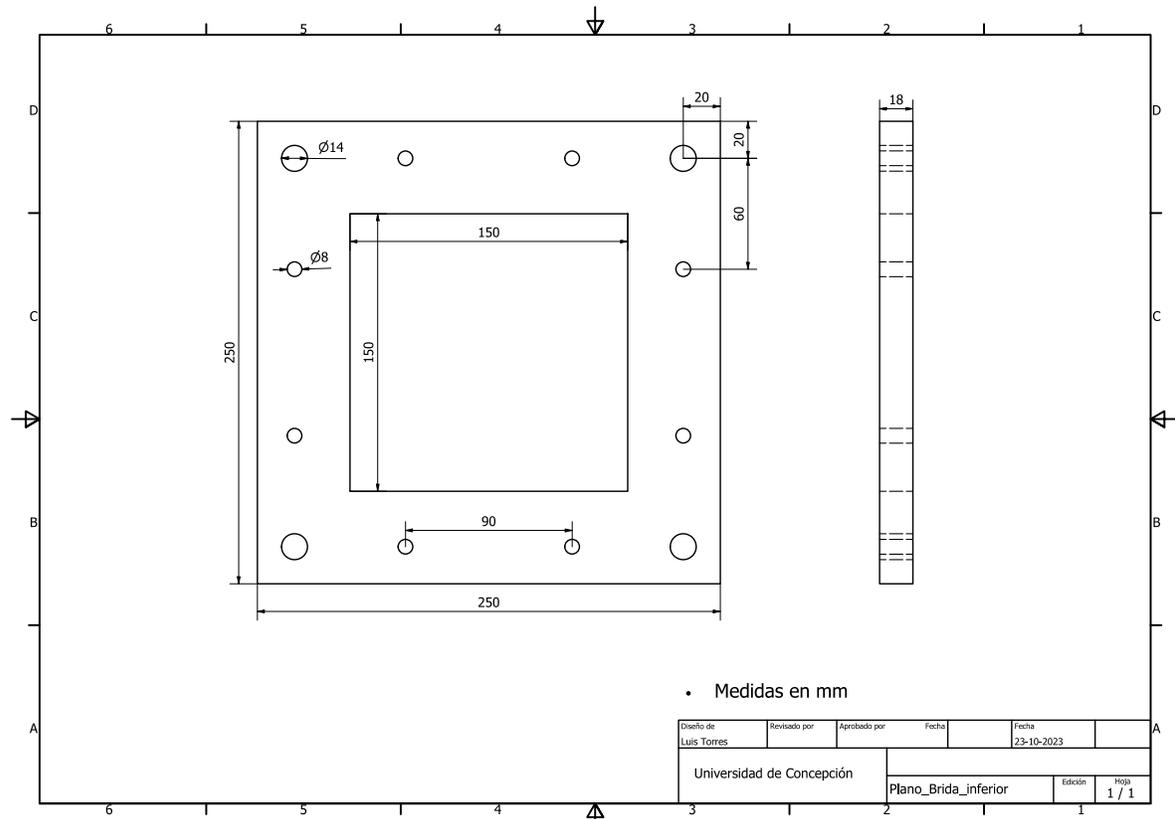


Figura B.3: plano mordaza inferior.

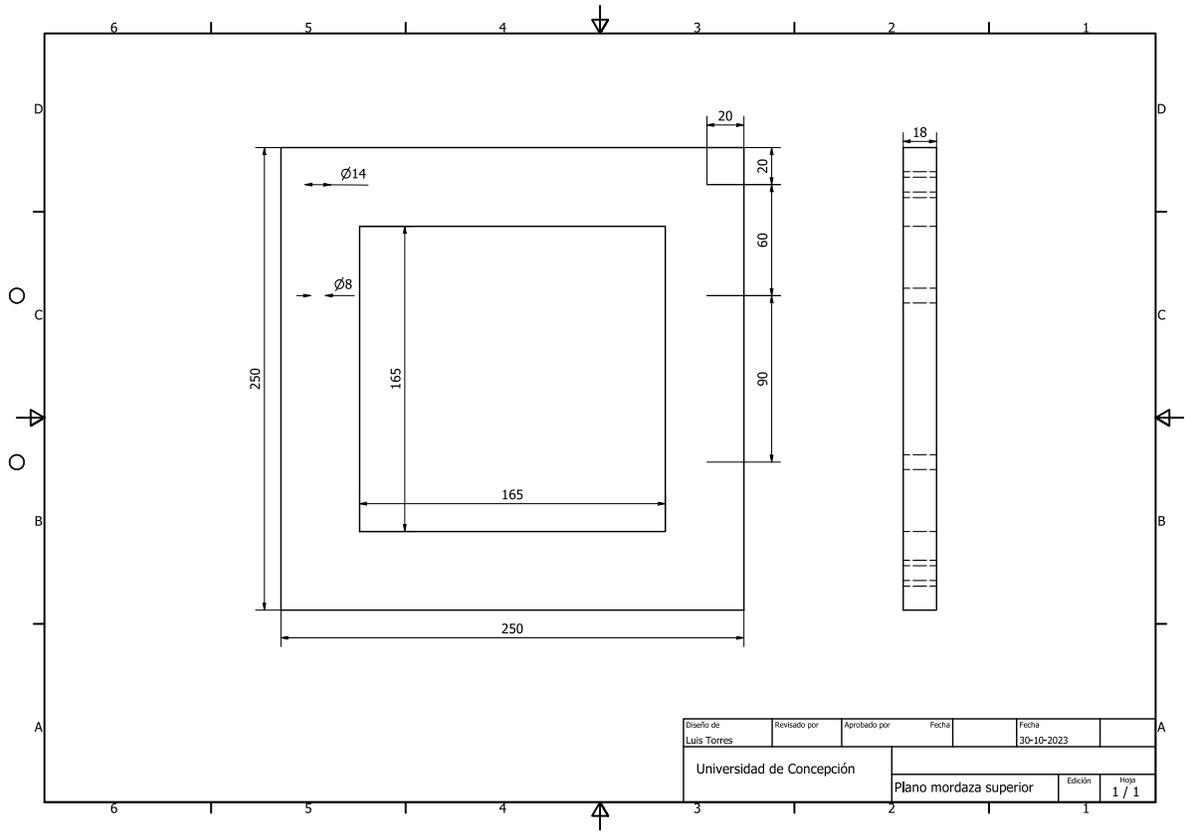


Figura B.4: plano mordaza superior.