



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO Y FABRICACIÓN POR
IMPRESIÓN 3D DE MATRICES
PARA EL CONFORMADO SPIF
DE LÁMINAS**

Alumna: Marina Jurado Herrera

Tutor: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Gustavo Medina Sánchez , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Diseño y fabricación por impresión 3D de matrices para el conformado SPIF de láminas, que presenta Marina Jurado Herrera, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Julio de 2022

El alumno:

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser "MJH", con trazos fluidos y entrelazados.

Marina Jurado Herrera

Los tutores:

Gustavo Medina Sánchez

ÍNDICE

1. RESUMEN	8
2. INTRODUCCIÓN	8
2.1. Objetivos	9
3. ANTECEDENTES	10
3.1. Proceso SPIF	10
3.2. Proceso Fabricación Aditiva	12
4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	14
4.1. Planteamiento del problema.....	15
4.2. Solución factores y niveles.....	16
5. MATERIALES, MAQUINARIA Y SOFTWARE.....	19
5.1. Materiales	19
5.2. Maquinaria y utillaje.....	20
5.2.1. Máquina fresadora	20
5.2.2. Punzón.....	22
5.2.3. Sierra de cinta.....	22
5.2.4. Impresora BQ Witbox	23
5.3. Instrumentos de medida.....	24
5.3.1. Mesa dinamométrica.....	24
5.3.2. Goniómetro	26
5.4. Software empleado	26
5.4.1. Catia	26
5.4.2. Autocad.....	27
5.4.3. Cura.....	27
5.4.4. WinUnisoft.....	27
5.4.5. DaqView.....	28
6. PROCESO EXPERIMENTAL.....	29
6.1. Fabricación de utillaje.....	29
6.1.1. Diseño.....	29
6.1.2. Impresión	34
6.2. Fabricación de chapa.....	43
6.2.1. Diseño.....	43
6.2.2. Fabricación	44
6.3. Deformación de probetas	45
6.3.1. Cálculo de trayectorias y código ISO.....	45
6.3.2. Simulación del proceso	50

6.3.3.	Preparación fresadora.....	54
6.3.4.	Ejecución ensayos y piezas obtenidas	55
7.	RESULTADOS OBTENIDOS	59
7.1.	Fuerzas de conformado	59
7.1.1.	Análisis de fuerzas obtenidas en el ensayo C1.1	61
7.1.2.	Fuerzas en el régimen permanente.....	63
7.1.3.	Análisis de los efectos principales	65
7.1.4	Comparación de los resultados de los ensayos efectuados	72
7.2.	Formabilidad: Ángulo de recuperación elástica	77
7.3.	Desgaste de matriz y pisador	83
8	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	85
9	REFERENCIAS.....	87
ANEXO I		88
	Código ISO Ensayo C1.1: Ángulo 90°, Radio 100 mm y ΔZ 0.25 mm	88
	Código ISO Ensayo C1.2: Ángulo 90°, Radio 70 mm y ΔZ 0.25 mm.....	92
	Código ISO Ensayo C1.3: Ángulo 90°, Radio valor infinito y ΔZ 0.25 mm.....	96

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Proceso de Conformado Incremental Monopunto, SPIF; FUENTE: [Internet]	11
Ilustración 2. Proceso Fabricación Aditiva; FUENTE: [Propia]	12
Ilustración 3. Máquina fresadora, modelo ODISEA; FUENTE: [Propia]	21
Ilustración 4. Punzón empleado; FUENTE: [Propia]	22
Ilustración 5. Sierra de cinta; FUENTE: [7]	23
Ilustración 6. Impresora BQ WitBox; FUENTE: [8]	24
Ilustración 7. Mesa dinamométrica; FUENTE: [Propia]	25
Ilustración 8. Esquema de conexión mesa dinamométrica; FUENTE: [1]	25
Ilustración 9. Goniómetro; FUENTE: [Propia]	26
Ilustración 10. Esquema del radio de doblado; FUENTE: [10]	30
Ilustración 11. Dimensiones matriz; FUENTE: [Propia]	31
Ilustración 12. Matriz final; FUENTE: [Propia]	32
Ilustración 13. Matriz final horizontal; FUENTE [Propia]	32
Ilustración 14. Dimensiones pisador; FUENTE: [Propia]	33
Ilustración 15. Pisador horizontal FUENTE: [Propia]	34
Ilustración 16. Pisador final; FUENTE: [Propia]	34
Ilustración 17. Captura software Cura matriz; FUENTE: [Propia]	37
Ilustración 18. Captura Software Cura pisador; FUENTE: [Propia]	37
Ilustración 19. Impresión matriz; FUENTE [Propia]	38
Ilustración 20. Impresión Pisador; FUENTE: [Propia]	39
Ilustración 21. Patrón de relleno; FUENTE: [Propia]	39
Ilustración 22. Matriz impresa cara superior; FUENTE: [Propia]	40
Ilustración 23. Matriz impresa lateral; FUENTE: [Propia]	40
Ilustración 24. Pisador impreso cara superior; FUENTE: [Propia]	41
Ilustración 25. Pisador impreso lateral; FUENTE: [Propia]	41
Ilustración 26. Conjunto matriz y pisador impresos; FUENTE: [Propia]	42
Ilustración 27. Conjunto matriz y pisador impresos lateral; FUENTE: [Propia]	42
Ilustración 28. Captura AutoCAD chapa; FUENTE [Propia]	44
Ilustración 29. Chapa obtenida; FUENTE: [Propia]	45
Ilustración 30. Captura software Catia; FUENTE: [Propia]	47
Ilustración 31. Trayectoria punzón; FUENTE: [Propia]	47
Ilustración 32. Simulación Ensayo C1.1 - R 100, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	51
Ilustración 33. Simulación Ensayo C1.2 - R 70, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	51
Ilustración 34. Simulación Ensayo C1.3 - R 0, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	52
Ilustración 35. Simulación Ensayo C2.1 - R 100, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	52
Ilustración 36. Simulación Ensayo C2.2 - R 70, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	53
Ilustración 37. Simulación Ensayo C2.3 - R 0, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]	53
Ilustración 38. Colocación del montaje; FUENTE: [Propia]	54
Ilustración 39. Ensayo experimental radio 100 mm; FUENTE: [Propia]	55
Ilustración 40. Ensayo experimental radio 70 mm; FUENTE: [Propia]	56
Ilustración 41. Ensayo experimental radio 0 mm; FUENTE: [Propia]	56
Ilustración 42. Chapa obtenida de Ángulo 90° y Δz 0.25 mm; FUENTE: [Propia]	57
Ilustración 43. Chapa obtenida de Ángulo 60° y Δz 0.25 mm; FUENTE: [Propia]	57
Ilustración 44. Chapa obtenida de Ángulo 90° y Δz 0.5 mm; FUENTE: [Propia]	58
Ilustración 45. Chapa obtenida de Ángulo 60° y Δz 0.5 mm; FUENTE: [Propia]	58
Ilustración 46. Fuerzas medidas Ensayo C1.1; FUENTE: [Propia]	61

Ilustración 47. Fuerzas medias Ensayo C1.1; FUENTE: [Propia]	62
Ilustración 48. Efectos principales de la fuerza principal; FUENTE: [Propia].....	67
Ilustración 49. Interacción Radio-Alfa de fuerza principal; FUENTE: [Propia]	68
Ilustración 50. Interacción Δz -Alfa de fuerza principal; FUENTE: [Propia]	68
Ilustración 51. Interacción Radio- Δz de fuerza principal; FUENTE: [Propia]	68
Ilustración 52. Efectos principales de la fuerza vertical; FUENTE: [Propia].....	69
Ilustración 53. Interacción R-Alfa de fuerza vertical; FUENTE: [Propia].....	70
Ilustración 54. Interacción Δz -Alfa de fuerza vertical; FUENTE: [Propia]	70
Ilustración 55. Interacción R- Δz de fuerza vertical; FUENTE: [Propia].....	70
Ilustración 56. Superficie de contacto 90°; FUENTE: [Propia].....	71
Ilustración 57. Superficie de contacto 60°; FUENTE: [Propia].....	71
Ilustración 58. Fuerzas principales Alfa90° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]	72
Ilustración 59. Fuerzas principales Alfa60° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]	73
Ilustración 60. Fuerzas principales Alfa 90° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]	73
Ilustración 61. Fuerzas principales Alfa60° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]	73
Ilustración 62. Fuerzas verticales Alfa90° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]	74
Ilustración 63. Fuerzas verticales Alfa60° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]	74
Ilustración 64. Fuerzas verticales Alfa90° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]	74
Ilustración 65. Fuerzas verticales Alfa60° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]	75
Ilustración 66. Fuerzas verticales R100; FUENTE: [Propia].....	76
Ilustración 67. Fuerzas principales R100; FUENTE: [Propia].....	76
Ilustración 68. Efectos principales del ángulo de recuperación; FUENTE: [Propia].....	80
Ilustración 69. Interacción R-Alfa del ángulo de recuperación; FUENTE: [Propia]	81
Ilustración 70. Interacción Δz -Alfa del ángulo de recuperación elástica; FUENTE: [Propia]..	82
Ilustración 71. Interacción R- Δz del ángulo de recuperación elástica; FUENTE: [Propia]	82
Ilustración 72. Antes matriz, cara superior; FUENTE: [Propia].....	83
Ilustración 73. Antes matriz, lateral; FUENTE: [Propia].....	83
Ilustración 74. Después matriz, cara superior; FUENTE: [Propia].....	83
Ilustración 75. Después matriz, lateral; FUENTE: [Propia].....	83
Ilustración 76. Antes pisador, cara superior; FUENTE: [Propia].....	84
Ilustración 77. Antes pisador, lateral; FUENTE: [Propia].....	84
Ilustración 78. Después pisador, cara superior; FUENTE: [Propia].....	84
Ilustración 79. Después pisador, lateral; FUENTE: [Propia].....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas en un proceso de fabricación aditiva.....	13
Tabla 2. Factores y niveles.....	17
Tabla 3. Combinaciones de los ensayos experimentales.	18
Tabla 4. Enumeración ensayos experimentales.	18
Tabla 5. Características del PVC aportadas por el fabricante. [5].....	19
Tabla 6. Características del PLA aportadas por el fabricante [6]	20
Tabla 7. Principales características técnicas fresadora. [3]	21
Tabla 8. Características técnicas sierra de cinta. [7].....	22
Tabla 9. Principales características técnicas de la impresora BQ WitBox. [8]	23
Tabla 11. Parámetros de impresión para matriz y pisador.....	35
Tabla 12. Fuerzas principales, secundarias y verticales en régimen permanente.....	64
Tabla 13. Combinación de ensayos experimentales.....	66
Tabla 14. Ángulos medidos en piezas deformadas.	78
Tabla 15. Ángulos de recuperación elástica en piezas deformadas.....	79
Tabla 16. Comparativa antes y después de la matriz.	83
Tabla 17. Comparativa antes y después del pisador.	84

1. RESUMEN

Este trabajo abarca los procesos de fabricación aditiva y de conformado incremental monopunto (SPIF). Por la parte del proceso de fabricación, se centra en el diseño, mediante un software CAD, y en la fabricación por impresión 3D de una matriz y un pisador. En cuanto al proceso de conformado SPIF, se realizan ensayos experimentales con láminas de PVC de 3 mm de espesor, variando el valor de ciertos parámetros, y un estudio comparando los resultados obtenidos y las geometrías finales de las piezas deformadas.

2. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han ido desarrollando nuevas tecnologías de fabricación flexible para satisfacer nuestras necesidades, como es el caso de la fabricación aditiva o el Conformado Incremental Monopunto (SPIF).

Los procesos de deformación de chapa convencionales son caracterizados por su escasa flexibilidad. Esto ocurre ya que suelen ser usados para producciones en serie por su alta inversión en equipos y el alto coste energético que conllevan. Además, es muy frecuente que se necesite utillaje específico para cada diseño de pieza que se realice. Ante esta situación, surgen tecnologías que solucionen ese inconveniente, como el conformado incremental, en concreto, el método SPIF. Esta técnica se lleva a cabo en un centro de mecanizado mediante una única herramienta que sigue una determinada trayectoria y va deformando progresivamente.

Algo similar ocurre con los procesos de fabricación convencionales, suponen un alto coste inicial de inversión y presentan escasa flexibilidad en cuanto a diseños, por lo que, son usados para producciones en serie. En cambio, la fabricación aditiva es un proceso que ofrece varias ventajas ya que se reducen los costes y los tiempos de fabricación y permite una fabricación personalizada.

Debido a todas estas ventajas con las que cuentan estas dos técnicas, es interesante el estudio de los parámetros que intervienen en los procesos y la influencia de ellos sobre los resultados obtenidos.

2.1. Objetivos

Mediante el presente trabajo se pretende realizar un estudio teórico – experimental sobre la adaptación del método SPIF para láminas de PVC de 3 mm de espesor. Para ello se definen los siguientes objetivos:

- Medición de la geometría interior del centro de mecanizado. Toma de datos de la capacidad de movimiento de la mesa dinamométrica y la herramienta, y del estado disponible.
- Realizar el diseño de una matriz y un pisador que se adapten a las características del centro de mecanizado del taller mecánico mediante software CAD.
- Fabricar mediante impresión 3D los útiles diseñados.
- Realizar el diseño de las chapas a deformar mediante software CAD, teniendo en cuenta la geometría de la matriz y el pisador.
- Planificar los ensayos experimentales a ejecutar, según los parámetros elegidos.
- Programación con lenguaje ISO de las trayectorias de deformación a seguir por el punzón.
- Simulación de los ensayos a realizar para comprobar que no se producen fallos.
- Preparación y puesta a punto del centro de mecanizado y, adaptación de las piezas fabricadas.
- Ejecutar ensayos experimentales de conformado de chapas en el centro de mecanizado con el utillaje fabricado.
- Medición de las fuerzas de conformado, la geometría final y el grado de desgaste del utillaje.
- Conocer el funcionamiento de la maquinaria, los instrumentos de medida y los software utilizados.
- Análisis de los resultados obtenidos, estableciendo un estudio comparativo entre los diferentes ensayos realizados.

3. ANTECEDENTES

Conforme pasa el tiempo, el número de estudios acerca de estos procesos va aumentando ya que son técnicas con un carácter novedoso e importantes ventajas, como se ha comentado en la introducción.

Debido a la innovación del método SPIF, es una técnica aún en desarrollo, por lo que, no se dispone de tanta información. En la Escuela Politécnica Superior de Jaén se han realizado varios estudios con esta tecnología de conformado de chapa incremental en los que se llevaron a cabo ensayos con láminas de distinto espesor o material y variando la forma o trayectoria a seguir por el punzón. A continuación, expongo algunos de estos trabajos que son necesarios analizar:

- Adaptación de un sistema de conformado incremental monopunto para láminas de aluminio, realizado por *Aguilera Sánchez, J.A. (2018)* [1] en el cual se realiza un estudio de la influencia de algunos parámetros y compara los resultados obtenidos de realizar una trayectoria circular y cuadrada, variando la geometría y propiedades físicas de la pieza obtenida.
- Influencia de la geometría de los punzones en el conformado por SPIF, realizado por *Mayas Morales, J. (2019)* [2] en el que se lleva a cabo un estudio de la influencia de la geometría del punzón sobre las fuerzas del proceso y la calidad superficial de la placa ensayada.
- Simulación de un sistema de conformado incremental monopunto, realizado por *Cazalla Moral, R. (2017)* [3] en el cual se realiza un estudio de la influencia de diferentes variables en la geometría obtenida comparando resultados entre ensayos experimentales y simulaciones con el control numérico.

3.1. Proceso SPIF

El SPIF (Single Point Incremental Forming) es un sistema de conformado incremental de chapa usando una única herramienta a partir de una trayectoria generada por un centro de mecanizado. Esta herramienta se desplaza siguiendo trayectorias 2D manteniendo constante la coordenada Z, que irá incrementando su

valor en cada pasada, lo cual, provocará una deformación progresiva en la lámina. En este proceso, la deformación es local ya que solamente la zona en contacto con el punzón es la que sufre la deformación, y la forma en la que este se mueva será la que determine la geometría final de la pieza.

La trayectoria seguida por el punzón sobre la lámina es fácilmente programable empleando lenguaje ISO. En este trabajo se incluirá la explicación para la obtención de trayectorias con distintos parámetros.

Para la ejecución de esta tecnología es necesario disponer de un sistema de sujeción para la lámina, que se fije a la mesa de trabajo de la máquina de CNC, para así, evitar el deslizamiento de la misma y facilitar su deformación.

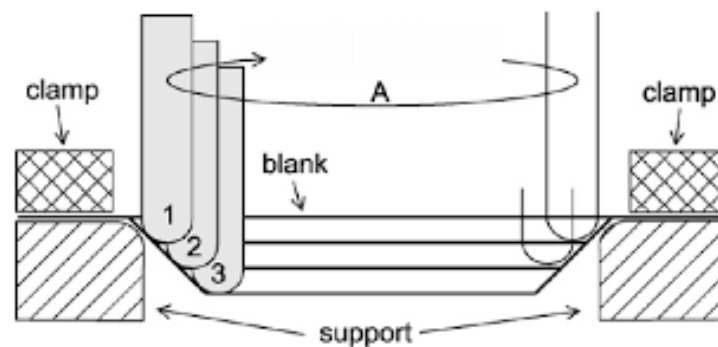


Ilustración 1. Proceso de Conformado Incremental Monopunto, SPIF; FUENTE: [Internet]

En este aspecto de ventajas y aplicaciones se han tenido en cuenta los trabajos de Aguilera Sánchez, J.A. [1] y Mayas Morales, J [2].

➤ PRINCIPALES VENTAJAS

- Cuenta con una gran flexibilidad ante cambios en el diseño.
- Existe un aumento en la conformabilidad del material.
- Se reducen los costes derivados de matrices y punzones.
- Las fuerzas son pequeñas, ya que las deformaciones son localizadas y se producen de forma incremental.
- Permite la posibilidad de obtener un buen acabado superficial

➤ APLICACIONES

- Implantes o prótesis: Permite la creación de estructuras a personalizadas.
- Moldes y troqueles: Permite fabricar piezas poliméricas o metálicas.
- Industria automovilística: Se pueden obtener componentes con geometrías complejas y que necesitan unas propiedades concretas.

3.2. Proceso Fabricación Aditiva

Para este apartado se ha tomado como referencia a Medina Sánchez, G. [4], en la cual, la fabricación aditiva es un proceso por el cual el material es depositado capa a capa de manera controlada y, permiten obtener piezas tridimensionales directamente desde archivos CAD.

Es una tecnología muy utilizada en múltiples sectores, ya sea en la industria automotriz, aeronáutica, médica o de bienes de consumo. Ofrece varias ventajas en comparación con los procesos de fabricación tradicionales, sobre todo, en flexibilidad, reducción de costes y ahorro de tiempo.

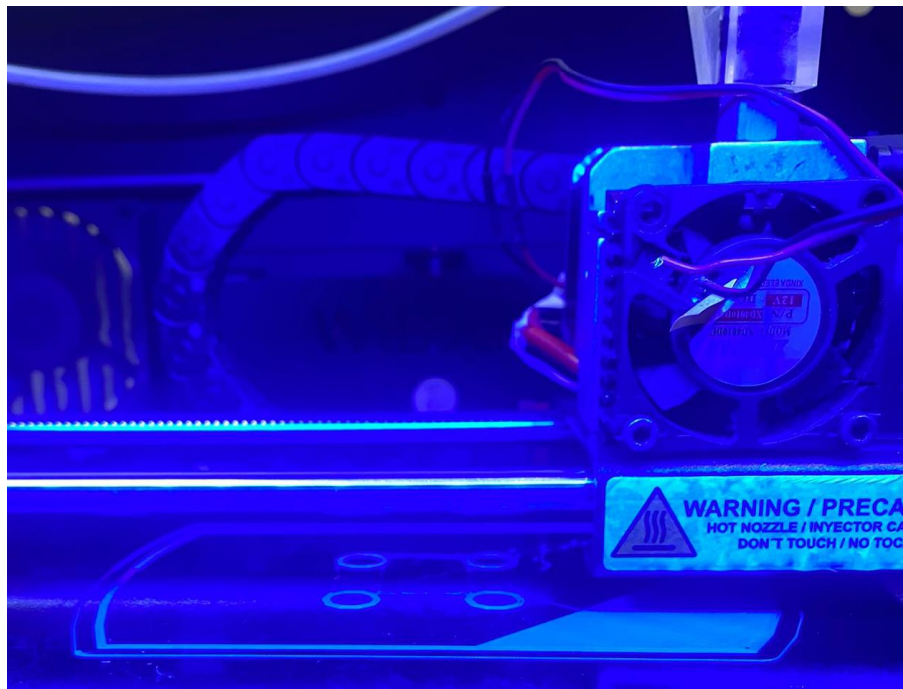


Ilustración 2. Proceso Fabricación Aditiva; FUENTE: [Propia]

A continuación se muestra una tabla con la sucesión de etapas en un proceso de fabricación aditiva:

ETAPAS EN UN PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA	
1	Modelo CAD. Se parte de un modelo digital de la pieza empleando un software CAD.
2	Discretización del modelo CAD. Se divide en capas una aproximación discreta del modelo CAD. El formato más empleado es el STL.
3	Obtención de capas y parámetros de la operación. Se definen los parámetros de la operación y se divide en capas mediante un software como Cura.
4	Impresión. Se imprime la pieza
5	Post procesado 1. Se elimina el material de soporte.
6	Post procesado 2. Se realizan operaciones de acabado.
7	Aplicación.

Tabla 1. Etapas en un proceso de fabricación aditiva.

➤ PRINCIPALES VENTAJAS

- Pueden obtenerse formas complejas sin aumento de tiempo o coste.
- La fabricación es personalizada, pueden crearse varias piezas con distintas características.
- Se simplifican partes y componentes, se pueden generar componentes más complejos y se pueden integrar varias partes en una.
- Es posible modificar la estructura del material a lo largo de una pieza para garantizar diferentes propiedades en diferentes localizaciones de la misma.

➤ APLICACIONES

- Componentes de automoción: permite la creación de componentes con menos restricciones de diseño, logrando productos más adaptados, más limpios geométricamente y más ligeros en menor tiempo.
- Modelos dentales: permite fabricar estructuras complejas, personalizadas y precisas, en menor tiempo, más económicas y con menor densidad.
- Prótesis mediante SLS: al igual que ocurre con los moldes dentales, permite una fabricación más precisa y personalizada, en menor tiempo, más económica y con menor densidad.

4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Atendiendo a Medina Sánchez, G. [4], el Diseño de Experimentos DoE es un método que permite analizar procesos en base a la planificación de experimentos y el análisis de los resultados. Su objetivo es planificar los experimentos a realizar para detectar que variables de entrada afectan más a un proceso.

Los principios básicos del Diseño de Experimentos serían:

- Aleatorización: Previene del sesgo. Se trata de ejecutar los ensayos en orden aleatorio.
- Replicación: Permite evaluar la dispersión (error). Consiste en repetir ensayos eligiendo de forma aleatoria una determinada combinación.
- Agrupación: Se trata de eliminar la variabilidad derivada de ruidos.

La metodología DoE básica consta de distintas fases:

- Fase de planificación: Se define el problema, se elige la variable de respuesta y los factores y se determina el número de niveles y las interacciones a considerar.
- Fase de diseño: Se define el tipo de experimento a realizar.
- Fase de experimentación: Se comprueba la viabilidad técnica del experimento.

- Fase de análisis: Se analizan los resultados mediante el gráfico de efectos principales.

Como después se observará en siguientes secciones, vamos a seguir una metodología DoE. En este apartado se va a desarrollar la fase de planificación, en la que, se va a realizar el planteamiento del problema, se elegirán las variables de respuesta que se van a analizar, y se escogerán los factores y niveles. En secciones posteriores se llevarán a cabo las demás fases de esta metodología, ya que se explicarán y desarrollarán los ensayos que se han realizado, y se hará uso del gráfico de efectos principales para analizar los resultados obtenidos.

4.1. Planteamiento del problema

El problema a desarrollar sería el conformado de láminas de PVC mediante el método SPIF utilizando una matriz y un pisador que impidan el deslizamiento de las chapas, diseñados mediante software CAD y fabricadas mediante impresión 3D. Se pretende visualizar y analizar la evolución de las fuerzas horizontales y verticales aplicadas en el proceso y la geometría obtenida en las chapas deformadas.

En primer lugar, obtenemos los valores de las fuerzas mediante el la tarjeta computadora de datos, la mesa dinamométrica y el software Daqview instalado en el ordenador disponible en el taller de la Universidad de Jaén. Y seguido esto, cuando se hayan realizado todos los ensayos experimentales, se medirán los ángulos finales obtenidos en las chapas deformadas, comparándolos con los ángulos que se aspiraban conseguir, y los ángulos de recuperación elástica.

Una vez tenemos definido el problema y los resultados que se pretenden analizar, podemos definir las variables de respuesta, que en nuestro caso serían la fuerza principal, la fuerza vertical y el ángulo de recuperación elástica. En función de estas variables de respuesta, se elegirán los diferentes factores y niveles que se van a analizar.

4.2. Solución factores y niveles

➤ DEFINICIÓN DE FACTORES

Como primer paso, basándonos en estudios previos, realizamos una lista de posibles factores que pueden tener influencia sobre nuestras variables a estudiar. Éstas serían:

- Ángulo de doblado de la chapa
- Profundidad de pasada del punzón
- Radio de curvatura en la trayectoria a seguir
- Tamaño del punzón
- Lubricación
- Giro del punzón
- Velocidad de avance del punzón
- Tamaño pisador y matriz
- Profundidad total
- Temperatura

Una vez tenemos los posibles factores, se decide, en función de ensayos experimentales realizados en otros trabajos anteriormente, que se van a analizar tres factores que son los considerados más importantes y en principio, se cree que pueden tener un efecto relevante sobre las variables de respuesta a estudiar. Estos factores serían el ángulo de doblado (α), la profundidad de pasada (Δz) y el radio de curvatura (R).

➤ DEFINICIÓN DE NIVELES

En cuanto a los niveles de cada factor, he seleccionado dos niveles para dos de estos factores, corresponderán al nivel -1 y 1, y tres para otro, que corresponderán al nivel -1, 0 y 1. En la siguiente gráfica podemos observar los valores de estos:

	-1	0	1
Alfa	90		60
Δz	0.25		0.5
R	100	70	∞

Tabla 2. Factores y niveles.

Cabe destacar que en un principio se pensó en un tercer nivel para el ángulo de deformación de 30°, pero al llevar a cabo unos estudios previos para ver la viabilidad de los ensayos, estudiar el comportamiento del material y ajustar los factores y niveles, se llegó a la conclusión de que con este ángulo apenas se obtenía deformación del material, con lo cual, se decidió quitar este nivel ya que no es muy significativo.

➤ DISEÑO FULL FACTORIAL

A continuación, se realiza un diseño Full Factorial para determinar el número total de combinaciones posibles, y con ello, facilitar el proceso de numeración de los ensayos.

- Definición de factores: ángulo de doblado (Alfa), profundidad de pasada (ΔZ), radio de curvatura (R)
- Definición de niveles: 2 para el ángulo de doblado y profundidad de pasada y 3 para el radio de curvatura
- Número de combinaciones posibles: n^k

Donde n es el número de niveles y k el número de factores, por lo que, obtendríamos:

$$n^k = 2^2 \cdot 3^1 = 12 \text{ ensayos}$$

(Fórmula 1)

Una vez tenemos el número total de ensayos, y definidos los niveles y factores, escribimos la matriz de diseño con todas las combinaciones posibles:

	R	Alfa	Δz
C1.1	-1	-1	-1
C1.2	0	-1	-1
C1.3	1	-1	-1
C2.1	-1	1	-1
C2.2	0	1	-1
C2.3	1	1	-1
C3.1	-1	-1	1
C3.2	0	-1	1
C3.3	1	-1	1
C4.1	-1	1	1
C4.2	0	1	1
C4.3	1	1	1

Tabla 3. Combinaciones de los ensayos experimentales.

A continuación podemos ver una tabla para una mejor visualización de los parámetros de cada ensayo:

	R	Alfa	Δz
C1.1	100	90	0.25
C1.2	70	90	0.25
C1.3	∞	90	0.25
C2.1	100	60	0.25
C2.2	70	60	0.25
C2.3	∞	60	0.25
C3.1	100	90	0.5
C3.2	70	90	0.5
C3.3	∞	90	0.5
C4.1	100	60	0.5
C4.2	70	60	0.5
C4.3	∞	60	0.5

Tabla 4. Enumeración ensayos experimentales.

5. MATERIALES, MAQUINARIA Y SOFTWARE

En este apartado se van a especificar las características de los materiales que se han usado para la fabricación de las piezas, la maquinaria utilizada en los dos procesos que se han llevado a cabo, deformación y fabricación aditiva y, los diferentes programas de software que se han utilizado.

5.1. Materiales

Se han empleado láminas de plástico de PVC de 3 mm de espesor, con las que se fabricarán las chapas para los posteriores ensayos, y un filamento de PLA biodegradable compuesto por Ácido Poliláctico, con el que se fabricará el utillaje. Los datos de estos materiales aportados por los fabricantes [5] y [6] son los siguientes:

PVC	
	Densidad: 1.47 g/cm ³
	Resistencia a la tracción: 55MPa
	Dureza: Shore D 65 a 80
	Módulo de elasticidad: 2500 MPa
	Coeficiente de fricción: 0.45
	Coeficiente de Poisson: 0.38 kJm ⁻²

Tabla 5. Características del PVC aportadas por el fabricante. [5]

PLA	
	Densidad: 1.24g/cm ³
	Temperatura de transición vítrea: 60 °C
	Resistencia a la tracción: 60 MPa
	Módulo de tracción: 3.5 GPa
	Módulo de flexión: 3.8 GPa

Tabla 6. Características del PLA aportadas por el fabricante [6]

5.2. Maquinaria y utillaje

Como se ha mencionado anteriormente se van a llevar a cabo dos procesos, para el de deformación se van a emplear la máquina fresadora, el punzón y la sierra de cinta. En cuanto al proceso de fabricación aditiva se hará uso de la impresora BQ Witbox. A continuación, se hará una breve descripción de los mismos.

5.2.1. Máquina fresadora

Se ha usado la máquina fresadora disponible en el taller mecánico, marca ALECOP y modelo ODISEA. A esta máquina le acoplaremos un sistema de sujeción e introduciremos los códigos correspondientes a nuestra trayectoria del SPIF.

A continuación, se muestra una tabla con las principales características técnicas de dicho centro de mecanizado, siguiendo a Cazalla Moral, R. [3], y una ilustración del mismo.

Principales características técnicas	
Recorrido en el eje longitudinal X	200 mm
Recorrido en el eje longitudinal Y	200 mm
Recorrido en el eje longitudinal Z	200 mm
Dimensiones de la mesa de trabajo	450x180 mm
Distancia máxima cabezal/mesa	320 mm
Velocidad de giro del cabezal	De 100 a 4000 rpm
Avance rápido	5000 mm/min
Resolución electrónica	0.001 mm
Apertura de la puerta	Automática
Dimensiones	1470x918x1855 mm

Tabla 7. Principales características técnicas fresadora. [3]



Ilustración 3. Máquina fresadora, modelo ODISEA; FUENTE: [Propia]

5.2.2. Punzón

Se ha empleado un punzón de acero ya que es más resistente, y, en nuestro caso, utilizaremos un diámetro de 10 mm. A continuación podemos visualizar una ilustración del mismo:

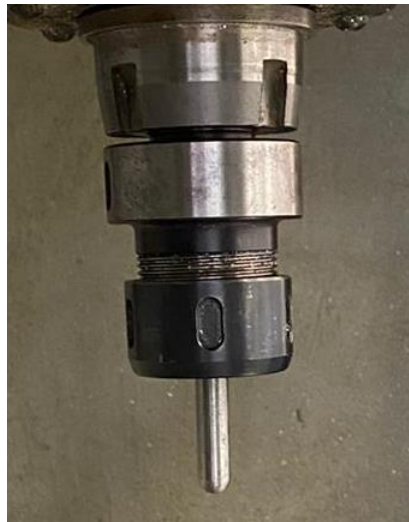


Ilustración 4. Punzón empleado; FUENTE: [Propia]

5.2.3. Sierra de cinta

Se ha hecho uso de la sierra de cinta disponible en el taller mecánico, marca Holzkraft y modelo HBS 533 S. Atendiendo al fabricante [7], se trata de una sierra de mesa montada en un soporte de balancín doble. Fijación simple y rápida del ángulo de inclinación establecido mediante sujeción rápida.

Principales características técnicas	
Peso neto	380 kg
Dimensiones	1.190x750x2.060 mm
Medidas de la mesa	850x600 mm
Altura máxima de corte	400 mm
Velocidad de corte	1.615 m/min

Tabla 8. Características técnicas sierra de cinta. [7]



Ilustración 5. Sierra de cinta; FUENTE: [7]

5.2.4. Impresora BQ Witbox

Se ha utilizado la impresora 3D disponible en el laboratorio, marca BQ y modelo WitBox. Atendiendo al fabricante [8], es una impresora completamente cerrada, con puerta frontal y sistema de bloqueo que impide el acceso accidental durante la impresión. Consta de dos paneles laterales, un panel superior y cuatro patas/soportes inferiores. A continuación se muestra una tabla con las principales características técnicas aportadas por el fabricante y, una ilustración de la misma.

Principales características técnicas	
Lecho de impresión	200x200 mm
Altura de capa mínima	De 0.1 mm
Dimensiones	505x388x450 mm
Peso	1 kg
Volumen de compilación	297x210x200 mm

Tabla 9. Principales características técnicas de la impresora BQ WitBox. [8]



Ilustración 6. Impresora BQ WitBox; FUENTE: [8]

5.3. Instrumentos de medida

Los instrumentos de medida son herramientas que se usan para medir una magnitud física. Las características más importantes de estos serían la precisión, exactitud, resolución, apreciación y sensibilidad. A continuación, se hará una breve descripción de los instrumentos de medición utilizados para llevar a cabo nuestro trabajo, una mesa dinamométrica y un goniómetro.

5.3.1. Mesa dinamométrica

Se ha usado una mesa dinamométrica disponible en el taller mecánico, marca KISTLER y modelo 9257BA. Atendiendo al fabricante [9], es de fácil montaje con bridas laterales, está anclada a la mesa de la fresadora y servirá de soporte para el montaje a colocar para la realización de nuestros ensayos.

La sólida configuración del dinamómetro permite medir con precisión fuerzas de gran dinamismo. Pero además de la mesa, son necesarios una unidad de control junto con un cable de conexión, y un ordenador que incluya una tarjeta de adquisición de datos y un software para la interpretación de datos de fuerza.

A continuación se muestra una ilustración de la mesa dinamométrica y un esquema de conexión:



Ilustración 7. Mesa dinamométrica; FUENTE: [Propia]

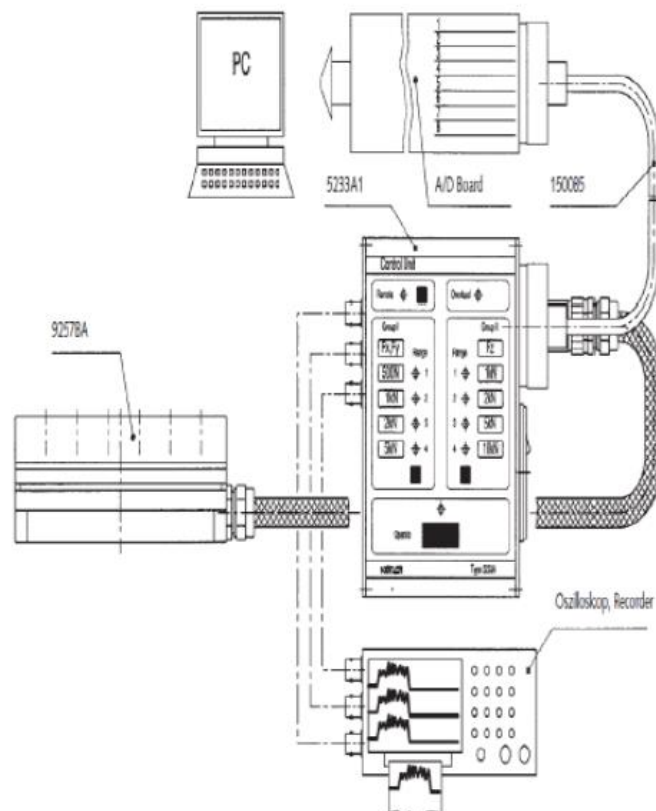


Ilustración 8. Esquema de conexión mesa dinamométrica; FUENTE: [1]

5.3.2. Goniómetro

Otro instrumento de medida utilizado es el goniómetro o transportador de ángulos disponible en el laboratorio de la Universidad de Jaén, marca PaV Vaduz. Este aparato nos permite medir el ángulo existente entre dos puntos, lo que nos será de gran utilidad una vez tengamos los ensayos realizados. A continuación se muestra una ilustración del mismo:



Ilustración 9. Goniómetro; FUENTE: [Propia]

5.4. Software empleado

En esta sección se realizará una breve descripción sobre cada uno de los software empleados, que nos han sido de gran utilidad para llevar a cabo nuestro trabajo. Por un lado, para el proceso de fabricación aditiva fueron necesarios Catia, AutoCAD y Cura, y por otro, para el proceso de deformación, WinUnisoft y DaqView.

5.4.1. Catia

CATIA (Computer-Aided Three Dimensional Interactive Application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora.

Posibilita la creación de piezas en 3D, por lo que, mediante este programa se han realizado los diseños del utillaje, matriz y pisador, cómo se detallará en la sección “6.1.1. Diseño”. Cabe destacar que este software da la posibilidad de

obtener códigos ISO automáticamente, aunque no ha sido usado en este trabajo ya que su obtención ha sido manual.

5.4.2. Autocad

AutoCAD es otro software de diseño utilizado que permite la creación y edición de geometría 2D y modelos 3D con sólidos, superficies y objetos. Es reconocido internacionalmente ya que posibilita

Mediante este programa se ha realizado el plano que se empleó como plantilla a la hora de fabricar las chapas para la realización de los ensayos.

5.4.3. Cura

Cura es un software diseñado para impresoras 3D que permite la configuración de los parámetros de impresión, como la densidad, forma o velocidad de impresión. Se introduce un archivo “.stl” de un software de diseño y genera un archivo “.gcode” compatible con la impresora 3D. Una vez hecho esto, se envía el archivo mediante un dispositivo para que después, la impresora fabrique la pieza. A través de él, también podemos visualizar el tiempo aproximado necesario para llevar a cabo la impresión.

Mediante este programa se ha efectuado la fabricación de la matriz y el pisador, cómo se explicará en la sección “6.1.2. Impresión”.

5.4.4. WinUnisoft

WinUnisoft es un programa dotado para realizar la simulación de programas en código ISO y, es compatible para torno y para fresadora. Consta de un gestor de datos de herramientas, orígenes, brutos, máquina... necesarios para definir un mecanizado. Este gestor permite modificar las medidas y la posición del cero referencia. Además, permite visualizar las simulaciones mediante la trayectoria de la herramienta sobre el sólido, o mediante la trayectoria seguida por la punta de la herramienta.

Mediante este software se han realizado todas las simulaciones previas a la ejecución de los ensayos experimentales, antes de transmitirlo a la fresadora, comprobando que no existían errores.

5.4.5. DaqView

DaqView es un software que adquiere y registra datos en el disco y, los muestra en tiempo real. Proporciona una configuración fácil, y permite exportar directamente a Excel.

Mediante este programa se han almacenado los valores de las fuerzas horizontales y verticales producidas en la realización de cada ensayo, y con los que, hemos podido realizar nuestro estudio y llegar a ciertas conclusiones.

6. PROCESO EXPERIMENTAL

En este apartado se pretende explicar detalladamente todo el procedimiento seguido para la realización de los diferentes ensayos experimentales. En primer lugar, se tratará la fabricación del utillaje, la matriz y el pisador, explicando su diseño e impresión. Seguidamente, la fabricación de las chapas, y por último, todo lo relacionado con la deformación de las probetas, como la generación del código ISO, las simulaciones previas a la ejecución y la obtención de las piezas finales.

6.1. Fabricación de utillaje

El primer paso para la realización de los ensayos sería la elaboración de la matriz y del pisador, que actuarán de sujeción a la hora de deformar las chapas, impidiendo el deslizamiento de la lámina y facilitando su deformación. La chapa descansa sobre la matriz, mientras el pisador la mantiene sobre ésta, y el punzón ejerce la presión necesaria para conformar la pieza, provocando que la chapa adquiera la forma deseada a través de las trayectorias seguidas por el punzón. El utillaje debe adaptarse a las características del centro de mecanizado del taller mecánico.

Para conseguir la forma deseada en las chapas deformadas, debemos diseñar una geometría para la matriz acorde a las trayectorias que va a realizar el punzón, ya que así, la chapa se va a ir adaptando a la matriz. El pisador debe tener unas dimensiones algo menores que la matriz para evitar posibles choques entre el punzón y éste, pero también tendrá la forma acorde a las trayectorias para una mejor deformación.

6.1.1. Diseño

❖ MATRIZ

Para la geometría de la matriz debemos tener en cuenta las características del centro de mecanizado, sobre todo a la hora de diseñar los taladros, y realizar un diseño acorde a éste. En primer lugar, se midieron las dimensiones de la mesa

dinamométrica, instrumento de medida que podemos observar en la sección “5.3.1 Mesa dinamométrica”.

Otro punto a destacar sobre el diseño sería la forma de la matriz, partiremos de un rectángulo, y como se mencionó en la sección “4.2 Solución factores y niveles” se van a estudiar tres radios de curvatura, de 100 mm, de 70 mm y de valor infinito, por lo que, constará de dos lados con radio de valor infinito y otros dos lados curvos con el valor de radio antes mencionado.

En cuanto a los taladros que necesita para su posterior sujeción a la mesa dinamométrica, se van a realizar cuatro en el centro de ésta de diámetro 8,64 mm, ya que el diámetro de los tornillos sería de 6,64 mm y se necesita algo más para encajar debido a la posterior fabricación mediante FA.

Para conseguir la deformación de las chapas sin causar excesivo daño a éstas, entre la superficie superior de la matriz y las laterales debe existir un radio mínimo de doblado para que así se vaya adaptando progresivamente.

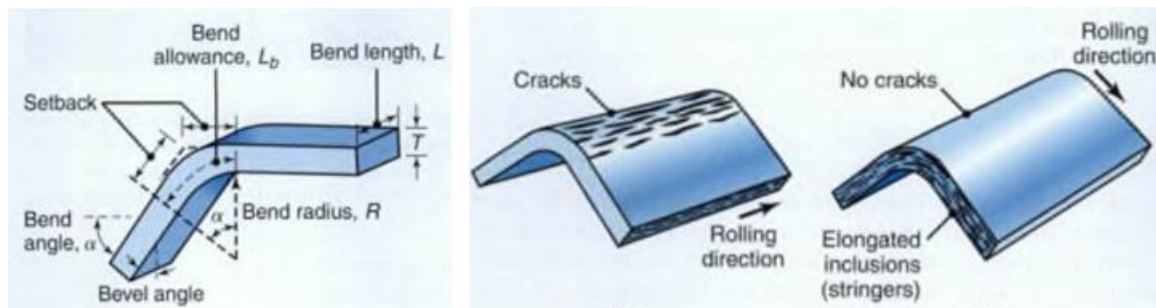


Ilustración 10. Esquema del radio de doblado; FUENTE: [10]

Este radio mínimo de doblado se escoge en función del espesor de la lámina y del material. En nuestro caso, usamos láminas de PVC de 3 mm de espesor, por lo que, se ha decidido que la mejor opción es escoger un radio mínimo de 10 mm ya que sería tres veces el espesor de la chapa.

Una vez planteada la geometría aproximada a desarrollar, se hizo uso del software Catia para su diseño, ya que nos permite obtener un archivo “.stl” para su

posterior impresión en la impresora 3D, punto que comentaremos en el próximo apartado.

A continuación, podemos observar una captura en la que se muestran las dimensiones de la superficie superior de la matriz:

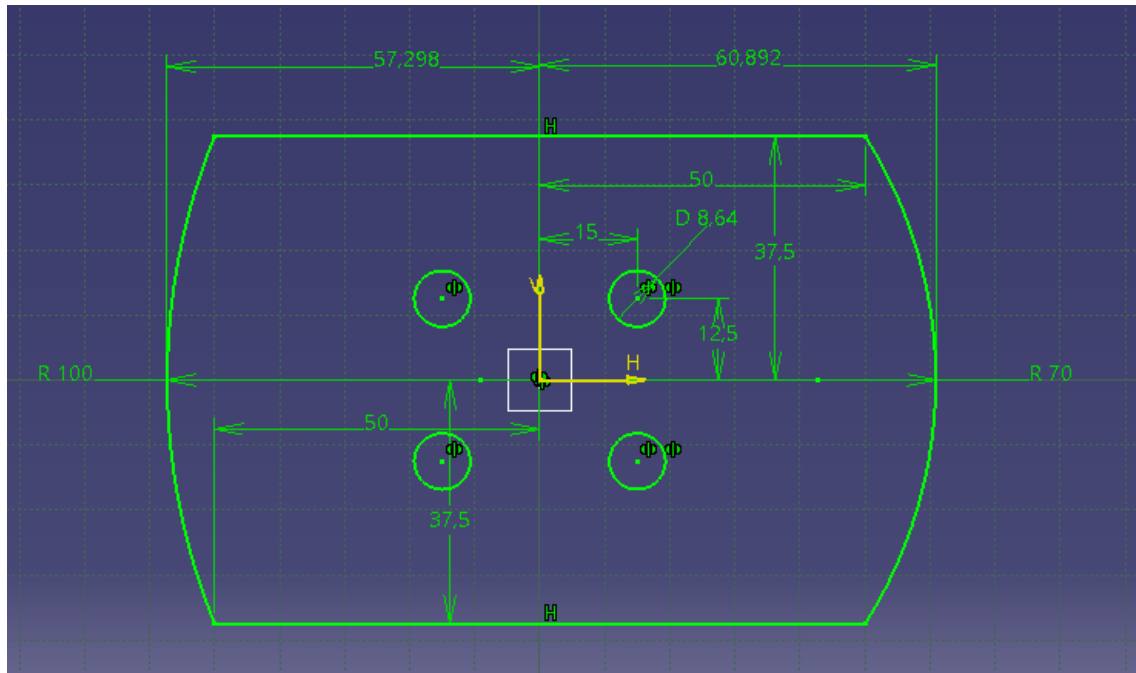


Ilustración 11. Dimensiones matriz; FUENTE: [Propia]

Seguido esto, podemos apreciar otras capturas de cómo quedaría el diseño final de la matriz:

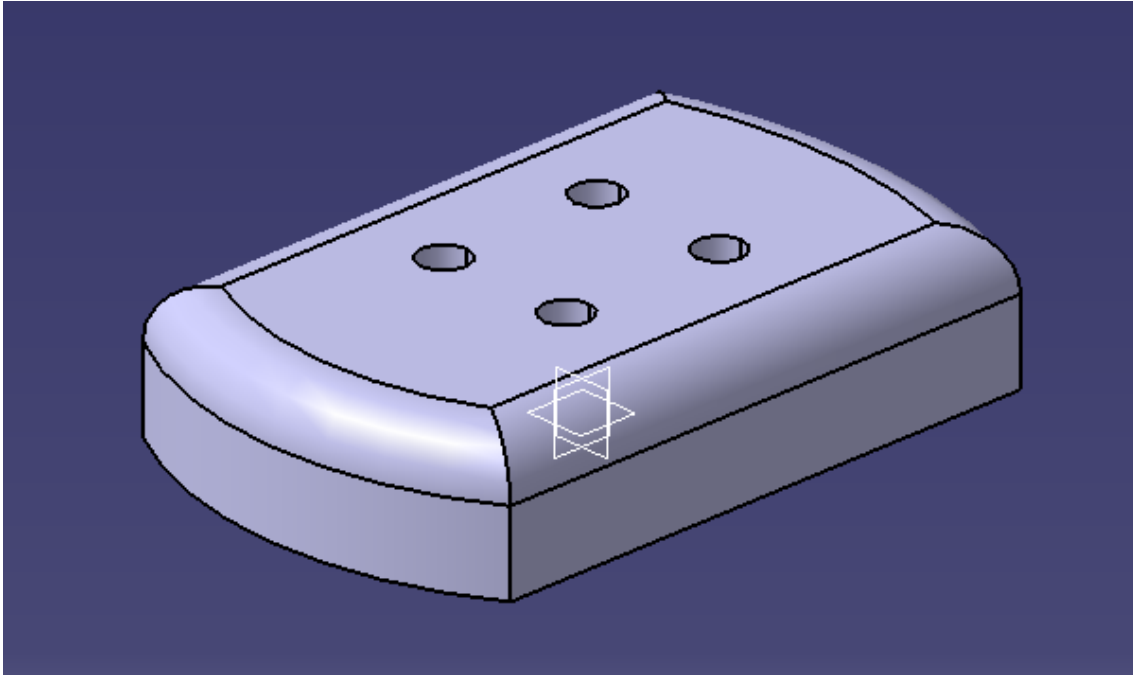


Ilustración 12. Matriz final; FUENTE: [Propia]

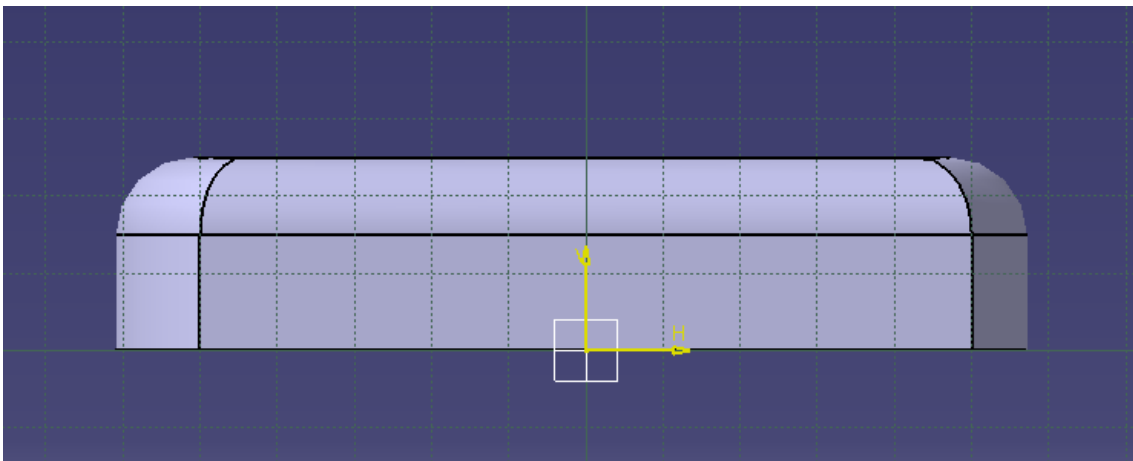


Ilustración 13. Matriz final horizontal; FUENTE [Propia]

Por último, concluir que la matriz consta de una altura de 25 mm, ya que se debía tener en cuenta la altura total del sistema de sujeción formado por la propia matriz, el pisador y la chapa, y además, los tornillos disponibles en el taller mecánico.

❖ PISADOR

Para la geometría del pisador se partió del diseño de la matriz para facilitar el trabajo ya que queremos obtener sus mismas dimensiones pero algo menores, y tener en cuenta las mismas consideraciones que para la matriz.

Cabe destacar que sí hay una diferencia en la geometría con respecto a la matriz, se realizó una pequeña marca justo en el centro de éste de 1 mm de profundidad y 10 mm de diámetro, ya que corresponde al diámetros de la herramienta, como ayuda a la hora de la realización de los experimentos en la colocación del punzón en el centro del montaje.

A continuación, podemos observar unas capturas en las que se muestran las dimensiones del pisador. En resumen, disminuyeron las dimensiones de la matriz 10 mm por cada lado.

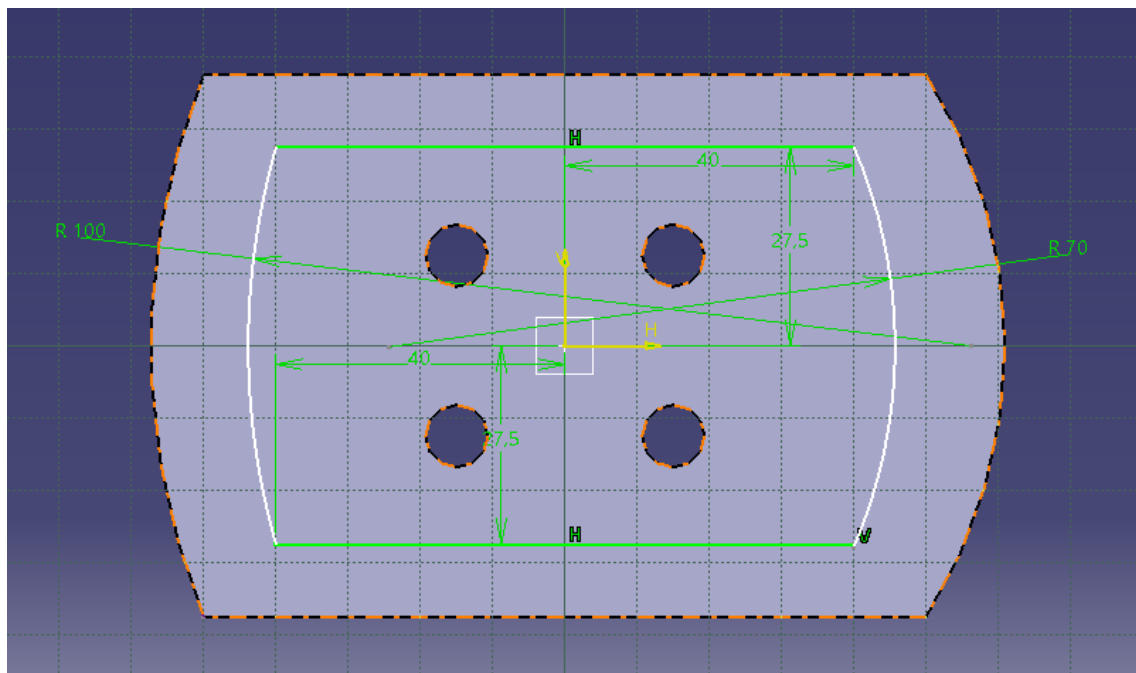


Ilustración 14. Dimensiones pisador; FUENTE: [Propia]

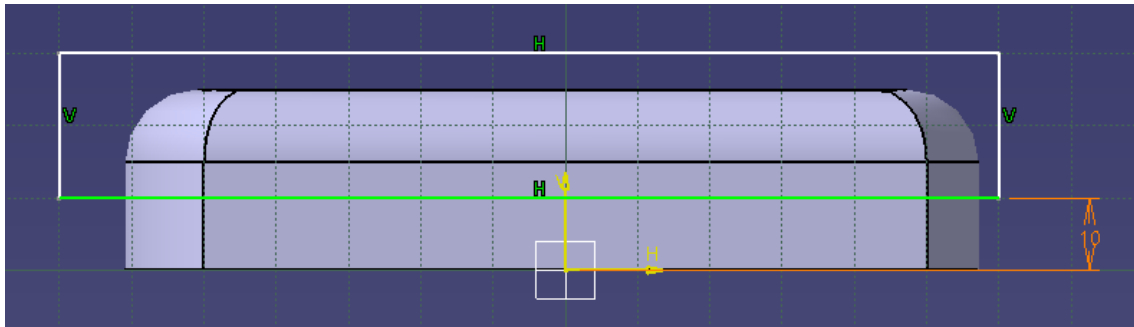


Ilustración 15. Pisador horizontal FUENTE: [Propia]

Se ha elegido una altura de 10 mm ya que esta dimensión debe ser bastante menor a la de la matriz y es suficiente para su función.

Seguido esto, podemos apreciar otra captura de cómo quedaría el diseño final del pisador:

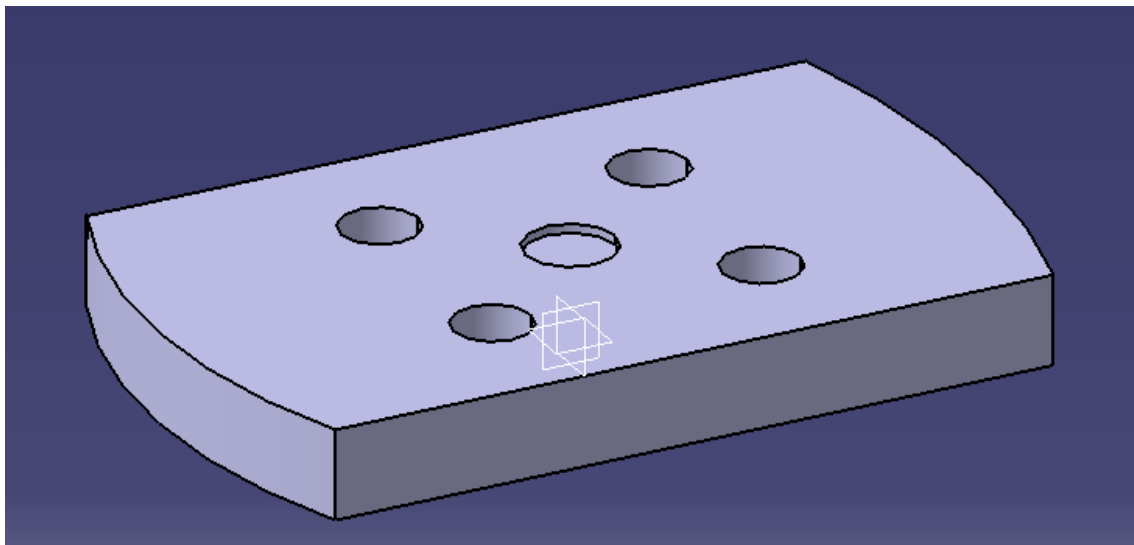


Ilustración 16. Pisador final; FUENTE: [Propia]

6.1.2. Impresión

Una vez se ha terminado el diseño del utillaje, procedemos a la fabricación de éstos mediante fabricación aditiva, que cómo se mencionó en la sección “5.1 Materiales”, se usará un filamento PLA biodegradable.

Para este apartado se ha utilizado el software Cura, que a partir de un archivo “.stl” obtenido a partir del archivo CAD de Catia, nos permite configurar los parámetros de impresión. Una vez hecho esto, se procede a la impresión mediante un archivo “.gcode” obtenido del software Cura.

En primer lugar, se configuran los parámetros de impresión, en este caso, hemos elegido las mismas características para la matriz y el pisador, y a continuación, se imprime la pieza.

➤ CONFIGURACIÓN DE IMPRESIÓN

En la siguiente tabla tenemos los principales parámetros de impresión con los valores definidos para la matriz y el pisador, y después, una breve explicación de cada uno de ellos y algunos parámetros más significativos a los que afectan:

PRINCIPALES PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	
Altura de capa	0.2 mm
Recuento de líneas de pared	3
Densidad de relleno	30 %
Patrón de relleno	Triángulos
Temperatura de impresión	205 °C
Velocidad de impresión	40 mm/s
Velocidad de relleno	50 mm/s
Velocidad de pared	20 mm/s
Grosor superior/inferior	1 mm
Tipo adherencia de la placa de impresión	Falda

Tabla 10. Parámetros de impresión para matriz y pisador

- Altura de capa: Altura de cada capa en mm. Los valores más altos producen impresiones más rápidas con una menor resolución, los valores más bajos producen impresiones más lentas con una mayor resolución. Afecta a:
 - Capas superiores e inferiores
 - Grosor de la capa de relleno
 - Velocidad normal del ventilador por capa

- Recuento de líneas de pared: Número de paredes. Afecta a:
 - Superposición del forro y del relleno
 - Distancia de pasada de relleno y distancia de expansión del forro
- Densidad de relleno: Ajusta la densidad del relleno de la impresión. Afecta a:
 - Capas superiores e inferiores
 - Distancia de línea de relleno y patrón de relleno
 - Espesor de soporte de los bordes
- Patrón de relleno: Patrón del material de relleno de la impresión. En nuestro caso elegimos un patrón de triángulo, por lo que, se imprime en todas las capas por completo, a diferencia del relleno de línea y zigzag que cambia de dirección en capas alternas, y del relleno cúbico que cambia en cada capa. Afecta a:
 - Distancia de línea de relleno
 - Conectar líneas de relleno
 - Superposición de relleno
- Temperatura de impresión: Afecta a:
 - Temperatura de impresión de la capa inicial
 - Temperatura de impresión inicial y final
- Velocidad de impresión: Velocidad a la que se realiza la impresión. Afecta a:
 - Velocidad de relleno
 - Velocidad superior/inferior
 - Velocidad de pared
- Velocidad de relleno: Velocidad a la que se imprime el relleno.
- Velocidad de pared: Velocidad a la que se imprimen las paredes. Afecta a:
 - Velocidad de pared exterior e interior
- Grosor superior/inferior: Grosor de las capas superiores e inferiores en la impresión. Este valor dividido por la altura de la capa define el número de capas superiores e inferiores.
- Tipo de adherencia de la placa de impresión: Opciones diferentes que ayudan a mejorar tanto la extrusión como la adherencia a la placa de impresión. En nuestro caso elegimos la falda, es una línea impresa alrededor del modelo pero que no está conectada al modelo.

A continuación, podemos ver una captura del software Cura en la que nos muestra cómo quedarían la matriz y el pisador, y en la que nos facilita el tiempo aproximado de impresión:

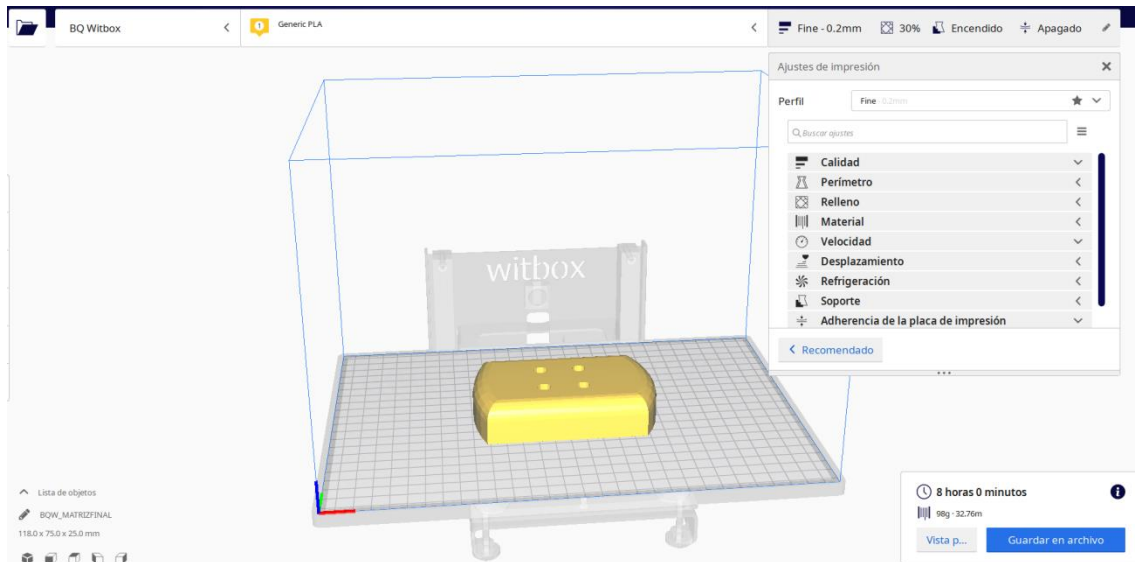


Ilustración 17. Captura software Cura matriz; FUENTE: [Propia]

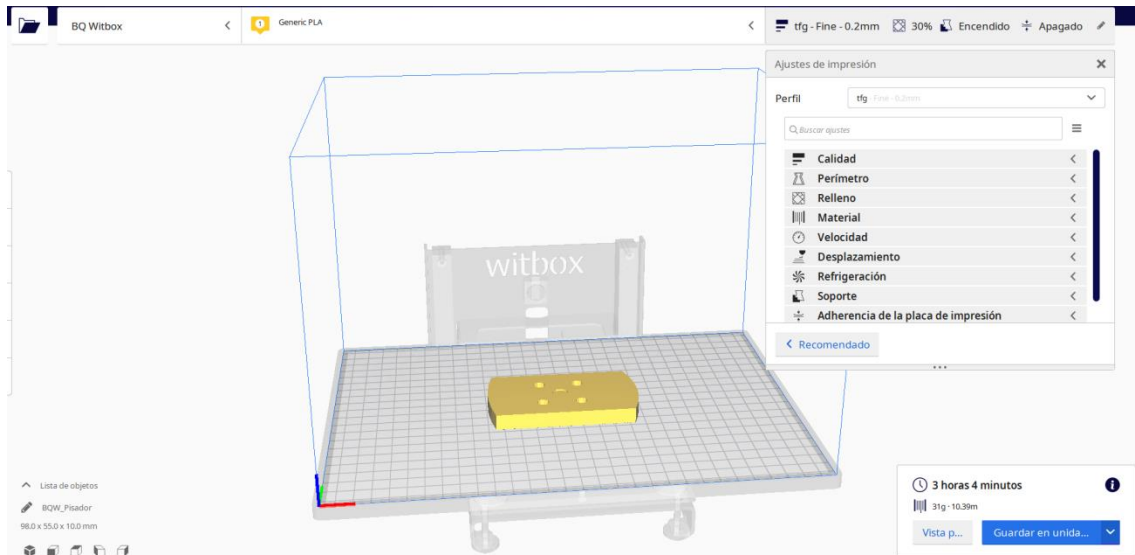


Ilustración 18. Captura Software Cura pisador; FUENTE: [Propia]

➤ IMPRESIÓN

Una vez definidos los parámetros, procedemos a la impresión del utillaje, para ello, como se ha mencionado anteriormente, es necesario haber guardado el archivo “.gcode” que proporciona el software Cura. En nuestro caso, hemos utilizado la impresora BQ Witbox, mencionada en la sección “5.2.3 Impresora BQ Witbox”.

Seguidamente, se pueden visualizar unas capturas realizadas en el proceso de impresión de las piezas.

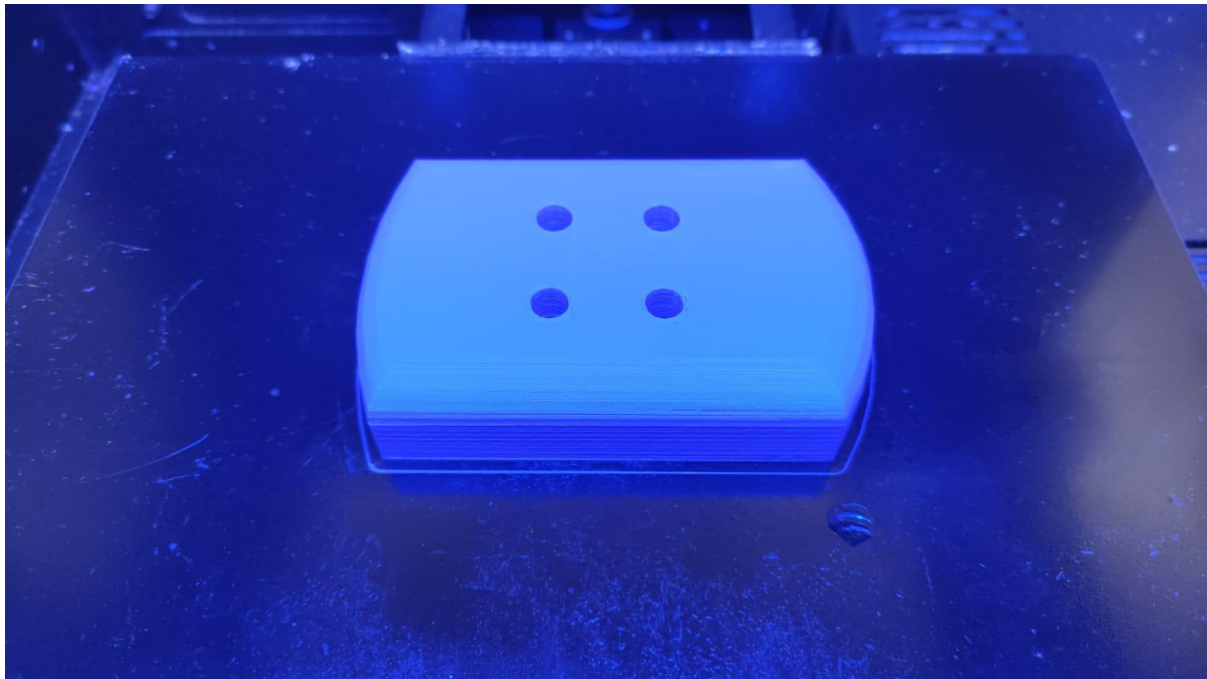


Ilustración 19. Impresión matriz; FUENTE [Propia]

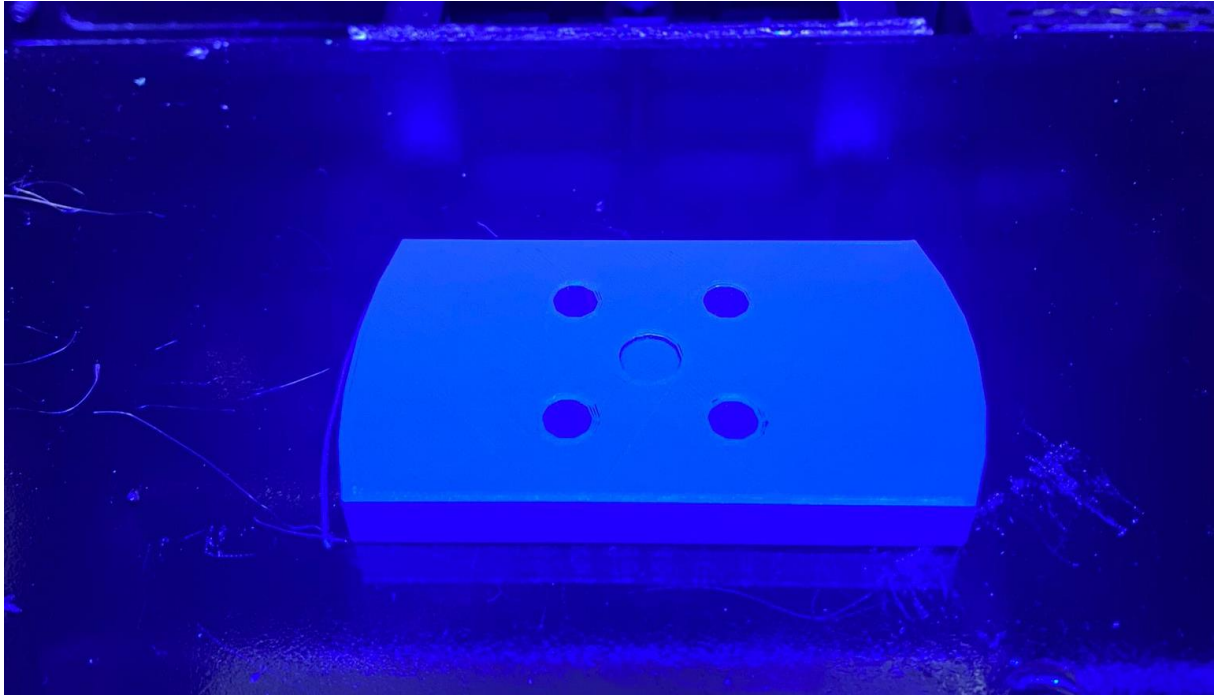


Ilustración 20. Impresión Pisador; FUENTE: [Propia]

Cabe mencionar que se produjeron algunos fallos a la hora de la impresión, debido a errores como la falta de filamento, por lo que, se obtuvieron piezas sin haber terminado la impresión por completo. Debido a esto, en la siguiente imagen podemos apreciar una impresión sin terminar en la que se puede visualizar perfectamente el patrón de relleno en forma de triángulos.

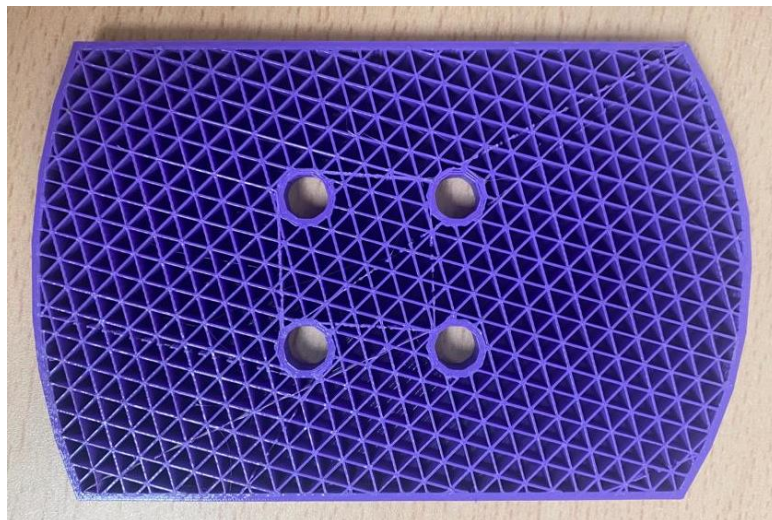


Ilustración 21. Patrón de relleno; FUENTE: [Propia]

➤ PIEZAS OBTENIDAS

Por último, en las siguientes capturas podemos visualizar mejor como quedaron la matriz y el pisador tras la impresión.

❖ MATRIZ



Ilustración 22. Matriz impresa cara superior; FUENTE: [Propia]

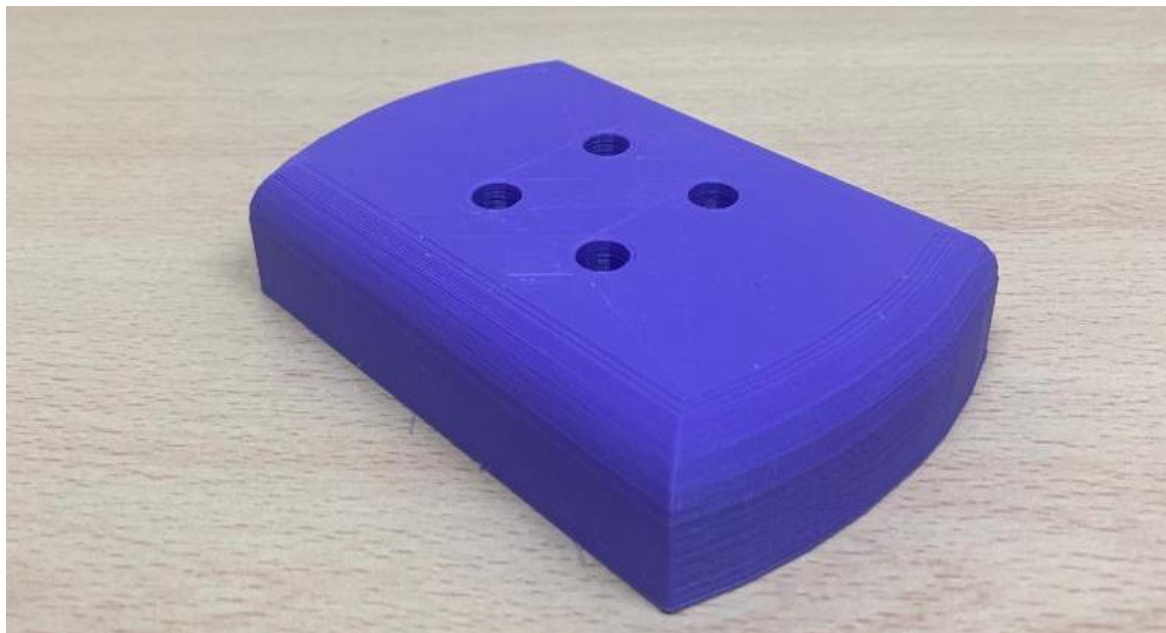


Ilustración 23. Matriz impresa lateral; FUENTE: [Propia]

❖ PISADOR

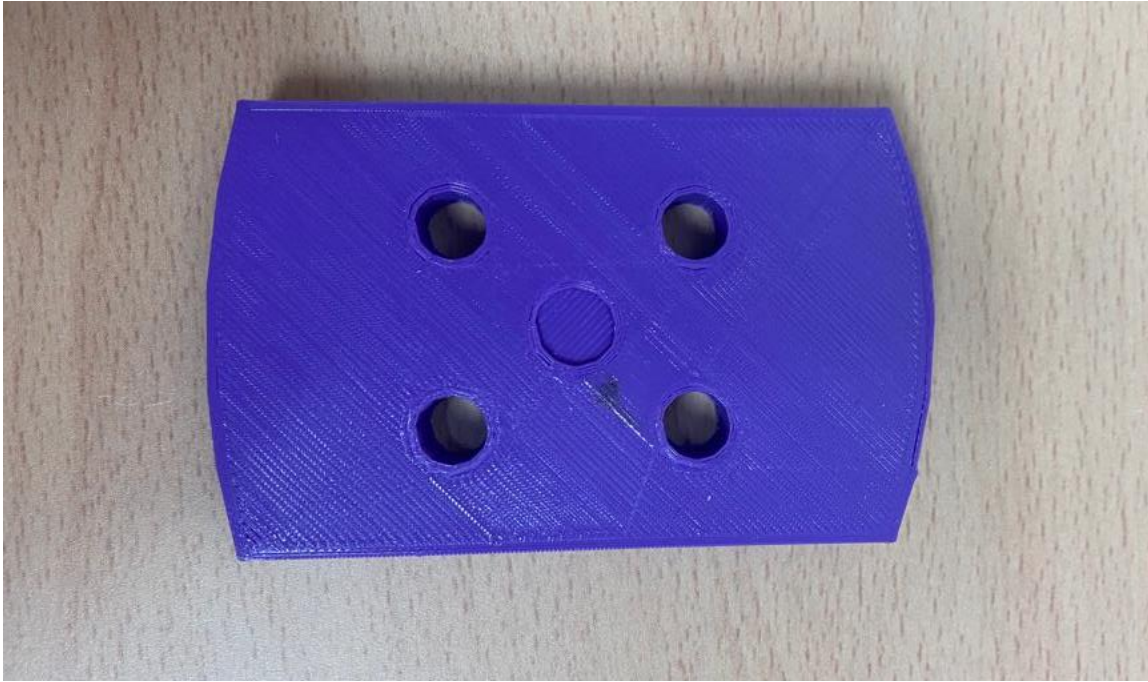


Ilustración 24. Pisador impreso cara superior; FUENTE: [Propia]

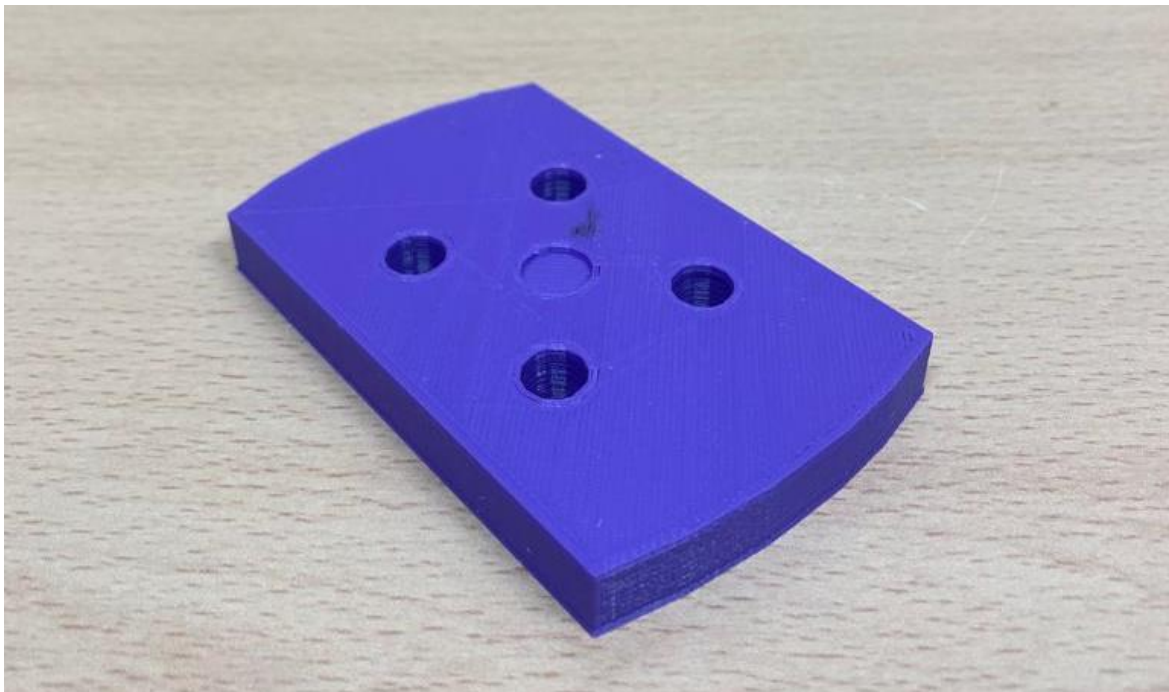


Ilustración 25. Pisador impreso lateral; FUENTE: [Propia]

❖ CONJUNTO

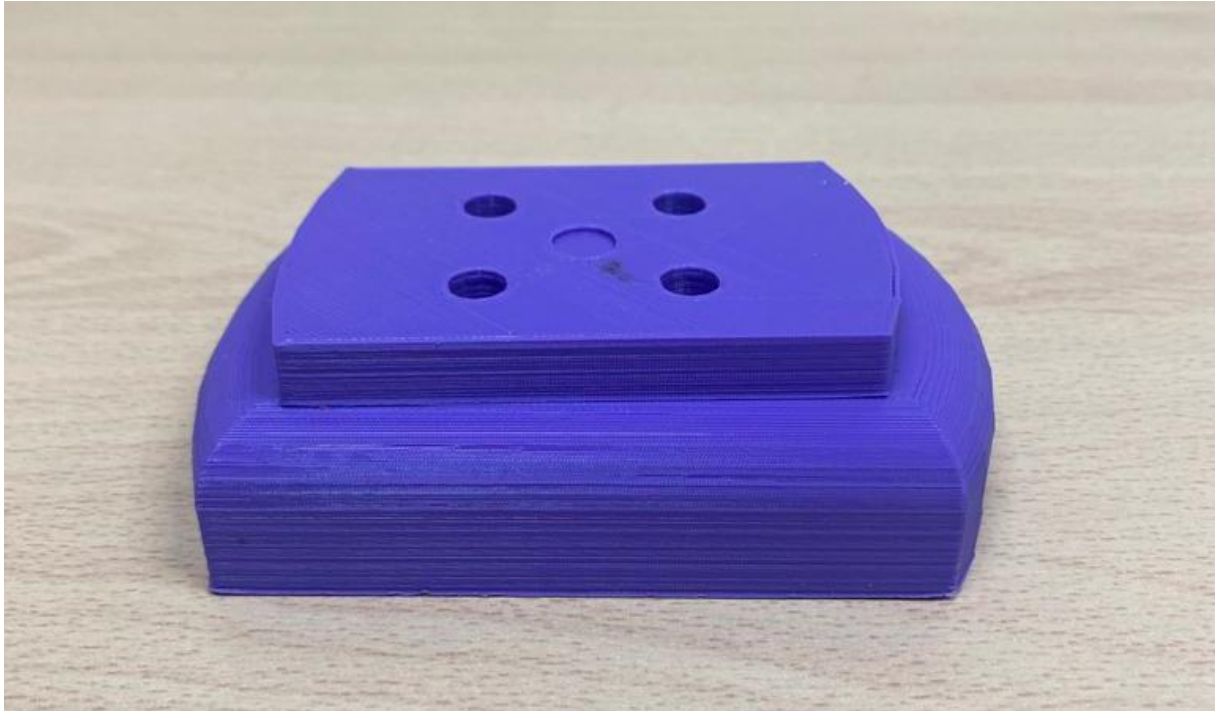


Ilustración 26. Conjunto matriz y pisador impresos; FUENTE: [Propia]



Ilustración 27. Conjunto matriz y pisador impresos lateral; FUENTE: [Propia]

6.2. Fabricación de chapa

Una vez tenemos elaboradas la matriz y el pisador, pasamos a la fabricación de las chapas. Para ello, partimos de láminas de PVC de 3 mm de espesor, mencionadas anteriormente en la sección “5.1 Materiales”.

6.2.1. Diseño

Para el diseño de las chapas hay que tener en cuenta que debe realizarse con unas dimensiones un poco mayores que las trayectorias que va a seguir el punzón, debe haber unos milímetros de más entre el recorrido de éste y la dimensión de la chapa, para evitar posibles roces entre el punzón y el filo de la chapa.

Las chapas constarán de cuatro lados, dos de ellos de mayor longitud que irán colocados en el sentido de los lados rectos de la matriz, en los que se llevará a cabo la deformación del radio de curvatura con valor infinito. Los otros dos lados constarán del mismo ancho pero distinta longitud ya que irán colocados en el sentido de los lados curvos de la matriz, en los que se llevará a cabo la deformación de los radios de curvatura de 100 mm y 70 mm. El lado que vaya en el sentido del radio de curvatura de 70 mm debe ser el de mayor longitud, aunque no será apreciable a primera vista.

Otro punto a destacar serían los taladros, para evitar fallos a la hora de realizarlos después, se decidió no incluirlos en el diseño principal y realizarlos una vez se tuviese la geometría general de las chapas.

Para el diseño de la geometría se ha utilizado el software AutoCAD, con el que se ha realizado un plano que servirá de plantilla para la posterior fabricación de éstas.

A continuación, podemos visualizar una captura del software AutoCAD en la que aparece la geometría de la chapa:

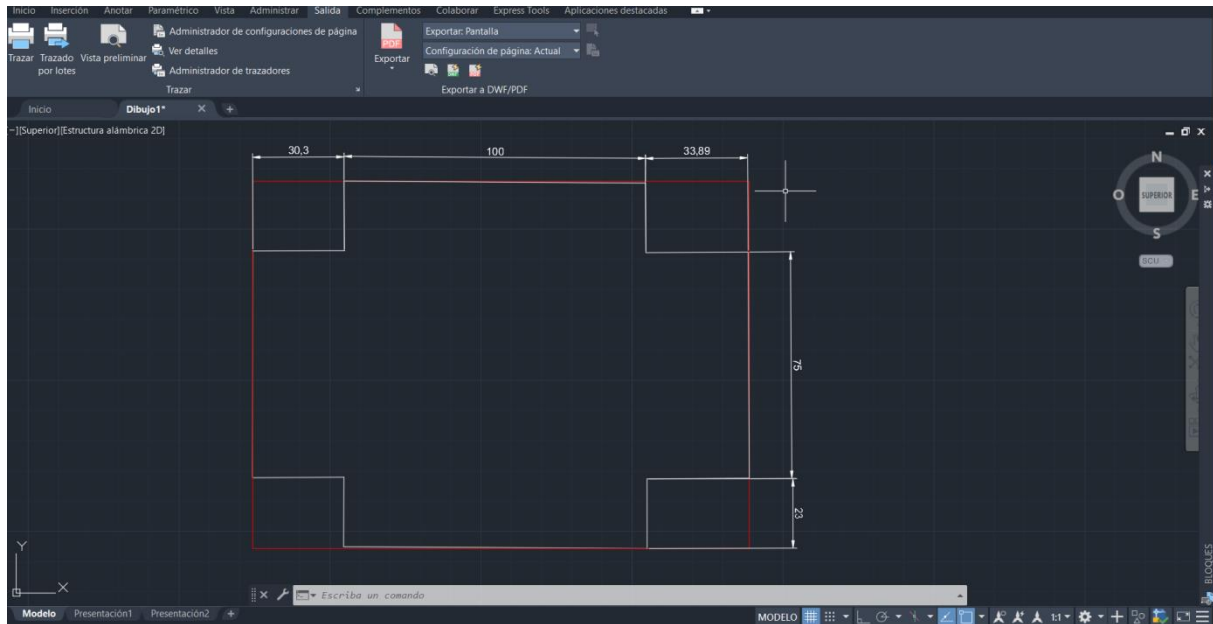


Ilustración 28. Captura AutoCAD chapa; FUENTE [Propia]

6.2.2. Fabricación

Una vez tenemos impresa la plantilla para las chapas, procedemos a su fabricación. Para ello, se hizo uso de la sierra de cinta, mencionada en la sección “5.2.4. Sierra de cinta”, disponible en el taller mecánico de la Universidad de Jaén.

Seguidamente se procedió a la realización de los taladros. Estos deben ir colocados en el centro de las chapas, con las mismas dimensiones que los realizados en la matriz y el pisador, para que después, en la realización de los ensayos, encaje todo el montaje entre la matriz, la chapa, el pisador y los tornillos.

Otro punto a destacar sería la realización de unos pequeños cortes en las esquinas de todas las chapas, para que a la hora de llevar a cabo el proceso de doblado hubiese más facilidad.

Por último, en la siguiente imagen podemos visualizar como quedó la chapa tras su fabricación:

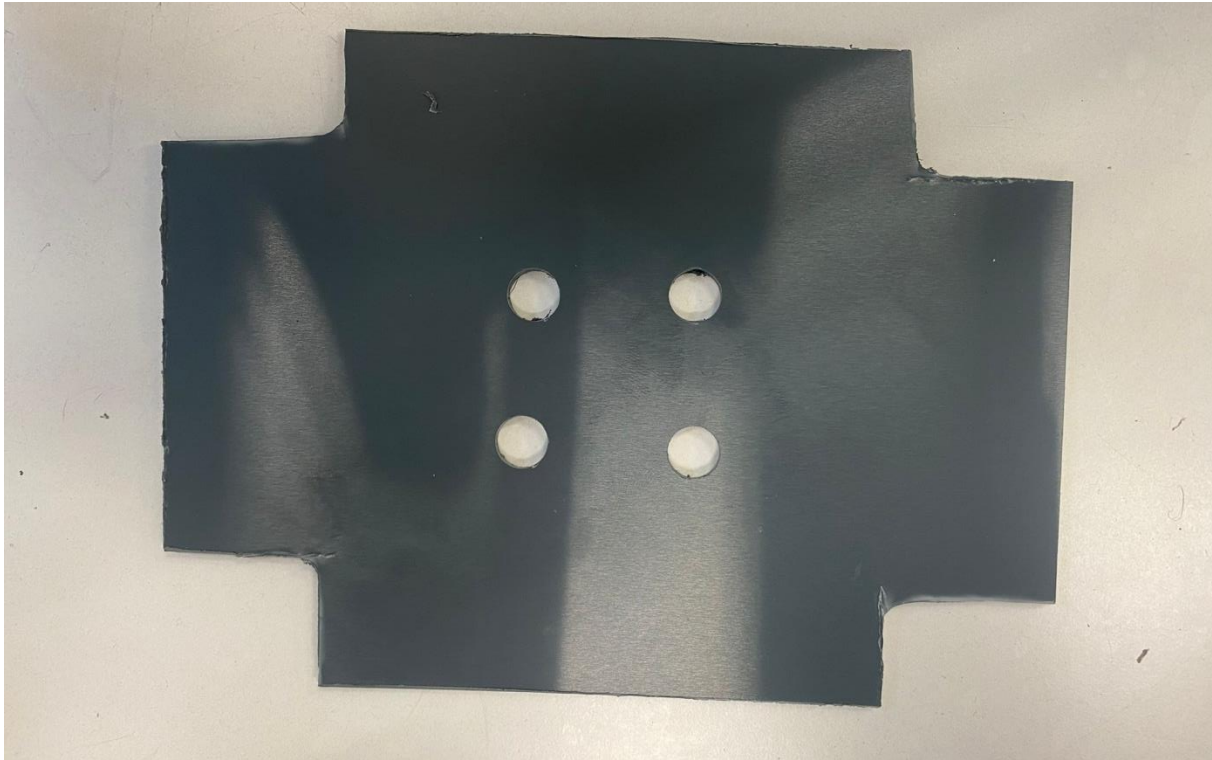


Ilustración 29. Chapa obtenida; FUENTE: [Propia]

6.3. Deformación de probetas

Una vez tenemos fabricadas la matriz, el pisador y las chapas procedemos a la realización de los ensayos experimentales. En este apartado se pretende desarrollar el procedimiento seguido, en primer lugar, se explicará la generación del código ISO para el cálculo de las trayectorias seguidas por la herramienta sobre las chapas. Seguido esto, se llevarán a cabo las simulaciones de los ensayos experimentales y se expondrán los pasos a seguir para la preparación y puesta a punto de la máquina fresadora. Por último, se explicará la ejecución de los ensayos y se visualizarán los resultados de las piezas obtenidas una vez deformadas.

6.3.1. Cálculo de trayectorias y código ISO

El código ISO es el lenguaje básico de la programación CNC, un lenguaje alfanumérico que indica a la máquina herramienta los movimientos que va a ejecutar. El CNC envía esas señales o entradas a la máquina y la máquina ejecuta unas salidas. Es utilizado para definir la trayectoria de la herramienta, en nuestro

caso el punzón, además de diferentes parámetros de funcionamiento. Este código debe incluir toda la información necesaria y contener un lenguaje entendible por el control numérico.

Para empezar se ha de elaborar el código ISO para cada uno de los doce ensayos que se quieren llevar a cabo, y para ello, se ha utilizado Excel para facilitar el trabajo. Los pasos a seguir son los mismos para todos los ensayos, solo cambian ciertos parámetros dependiendo de los factores del ensayo. En primer lugar se explicará la obtención de las coordenadas X, Y y Z, y después, se detallarán las funciones utilizadas.

➤ OBTENCIÓN DE COORDENADAS X, Y, Z

Primeramente, he agrupado los ensayos según el factor del radio de curvatura, por lo que, por un lado, se analizarán los códigos de los ensayos C1.1, C2.1, C3.1 y C4.1, correspondientes a un radio de curvatura de 100 mm, después, los de los ensayos C1.2, C2.2, C3.2 y C4.2, correspondientes al radio de curvatura de 70 mm, y por último, los de los ensayos C1.3, C2.3, C3.3 y C4.3, correspondientes al radio de curvatura de valor infinito.

A continuación se explica detalladamente el procedimiento a seguir en la obtención de las coordenadas mediante Excel, las consideraciones que hay que tener en cuenta y cómo se han ido calculando ciertos parámetros.

En primer lugar aproximamos la herramienta al montaje, teniendo en cuenta la existencia de los tornillos y tuercas para evitar choques entre ellos.

Después, calculamos las coordenadas X e Y de los puntos iniciales y finales de los recorridos de cada ensayo, ya que la coordenada Z era un factor que según el ensayo será de 0.25 mm o 0.5 mm. A continuación, podemos ver una captura del software Catia con las dimensiones de la matriz y que justamente coincide con la colocación de ésta en la fresadora, por lo que, podemos observar la orientación de los ejes de coordenadas.

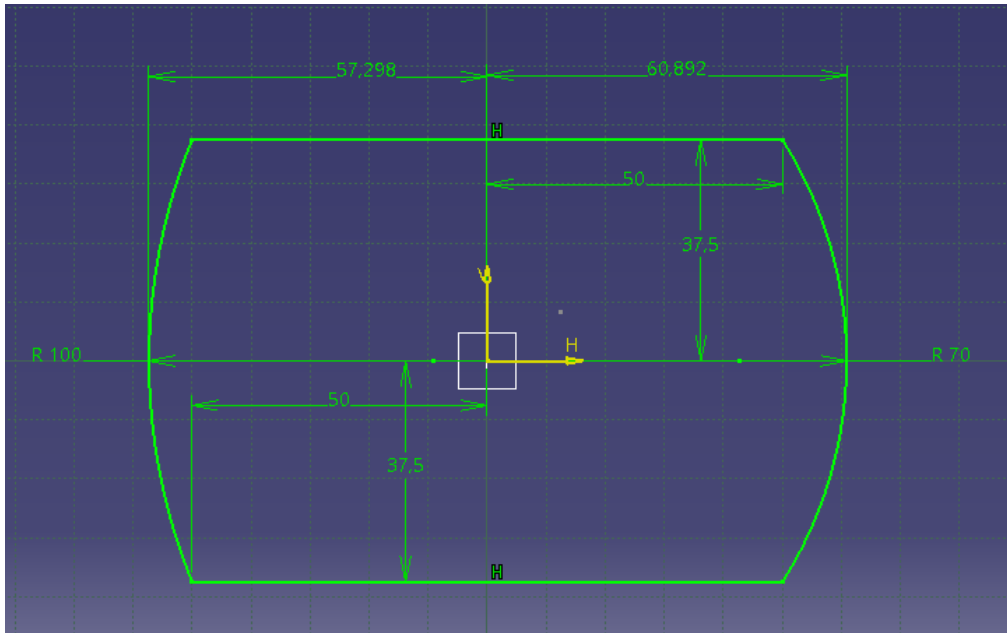


Ilustración 30. Captura software Catia; FUENTE: [Propia]

En la siguiente ilustración podemos apreciar cómo sería la trayectoria del punzón con un ángulo de doblado diferente de 90° .

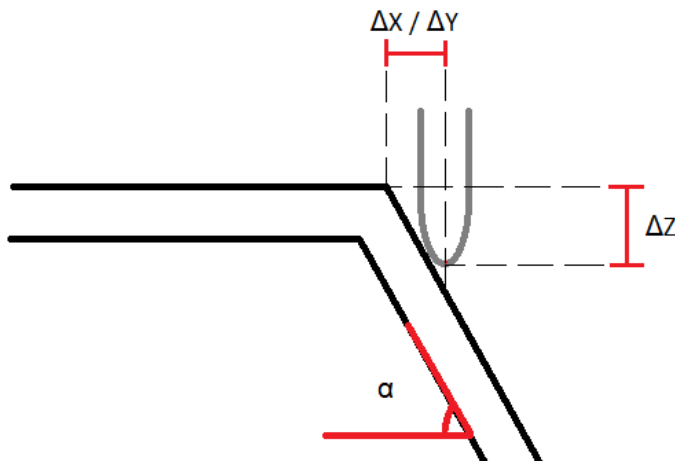


Ilustración 31. Trayectoria punzón; FUENTE: [Propia]

A continuación, como hemos mencionado anteriormente, analizaremos las coordenadas para cada radio de curvatura de forma general. Un punto a destacar sería que según el radio de curvatura, habrá que tener en cuenta, además de la dimensión de la matriz, los 3 mm de espesor de la chapa y los 5 mm de radio de la

herramienta. Esto afecta en la coordenada X para los radios de 100 y 70 mm, y en la coordenada Y para el radio con valor infinito.

- Ensayos con radio de curvatura de 100 mm:

La coordenada X será negativa y mantendrá el valor constante con un ángulo de doblado de 90° pero variará con un ángulo de doblado de 60°. Tendremos que calcular un ΔX que se va incrementando al valor anterior:

$$\Delta X = -\Delta Z / \operatorname{tg} \alpha$$

(Fórmula 2)

Donde α corresponde al ángulo de doblado y ΔZ a la profundidad de pasada, 0.25 mm o 0.5 mm.

La coordenada Y mantendrá constante el valor absoluto, pero variará de negativo a positivo en cada pasada, independientemente del ángulo y de la profundidad de pasada.

La coordenada Z irá variando según la profundidad de pasada dependiendo del ensayo. La coordenada Z final, la profundidad total, sería de 25 mm, y una vez alcance ese valor, termina el programa.

- Ensayos con radio de curvatura de 70 mm:

La coordenada X será positiva y mantendrá el valor constante con un ángulo de doblado de 90° pero variará con un ángulo de doblado de 60°. Tendremos que calcular un ΔX que se va incrementando al valor anterior:

$$\Delta X = \Delta Z / \operatorname{tg} \alpha$$

(Fórmula 3)

Las coordenadas Y y Z se calcularían de igual forma que para el radio de curvatura de 100 mm.

- Ensayos con radio de curvatura de valor infinito:

La coordenada X mantendrá constante el valor absoluto, pero variará de negativo a positivo en cada pasada, independientemente del ángulo y de la profundidad de pasada.

La coordenada Y será positiva y mantendrá el valor constante con un ángulo de doblado de 90° pero variará con un ángulo de doblado de 60°. Tendremos que calcular un ΔY que se va incrementando al valor anterior:

$$\Delta Y = \Delta Z / \operatorname{tg} \alpha$$

(Fórmula 4)

La coordenada Z se calcularía de igual forma que para los radios de 100 mm y 70 mm, pero en este caso la coordenada Z final, la profundidad total, sería de 20 mm, y una vez alcance ese valor, termina el programa.

➤ FUNCIONES UTILIZADAS

Una vez detallado todo lo relevante a la obtención de las coordenadas X, Y, Z, procedemos a comentar las funciones empleadas atendiendo a Medina Sánchez, G. [11]. Estas funciones acompañan a las coordenadas y cada una desempeña una función diferente.

❖ Funciones de iniciación:

- G53: Traslados de origen. Esta función se utiliza para definir el cero de referencia en el Software WinUnisoft para situar la herramienta. Como veremos a continuación, sólo se empleará en las simulaciones pero se eliminará al importarlo en la fresadora.
- G90: Programación en cotas absolutas (cartesianas).
- G94: Velocidad de avance “F” en mm / minuto. En nuestro caso, definimos una velocidad de avance de 1000 mm /min.
- G97: Velocidad de giro “S” en rev / min. En nuestro caso, definimos un valor de 0 ya que no queremos que el punzón gire.

❖ Funciones de interpolación:

- G00: Posicionamiento rápido. Esta función nos permite mover rápidamente la herramienta, la empleamos para aproximarnos a la pieza, ya que no hay riesgos de colisión con ésta.
- G01: Interpolación lineal a velocidad de avance controlada F. Esta función la usaremos al desplazarnos en el eje Z, y en los códigos de los ensayos con radio de curvatura de valor infinito.
- G02: Interpolación circular a derechas (sentido horario). Esta función la usaremos al desplazarnos en el eje Y en los códigos de los ensayos con radio de curvatura de 100 mm y 70 mm, y va acompañada del valor del radio.
- G03: Interpolación circular a izquierdas (sentido anti-horario). Mismo uso que G02 pero diferente sentido.

❖ Funciones auxiliares o modales:

- M06: Programación de la herramienta. Esta función, al igual que G53, sólo se empleará en las simulaciones en el software WinUnisoft pero se eliminará al importarlo en la fresadora.
- M30: Fin de programa y RESET general, con vuelta al comienzo.

6.3.2. Simulación del proceso

Una vez tenemos generados todos los códigos ISO, procedemos a realizar las simulaciones de los ensayos antes de la ejecución para comprobar que no se producen fallos. Para ello, haremos uso del software WinUnisoft, en el que, como hemos mencionado anteriormente, debemos definir para cada programa el centro de coordenadas, la velocidad de avance y la velocidad de giro. A continuación se muestran las diferentes ilustraciones de las simulaciones obtenidas. No se han incluido los ensayos con profundidad de pasada de 0.5 mm ya que no se aprecia diferencia con respecto a los de 0.25 mm, pero sí se realizaron las simulaciones.

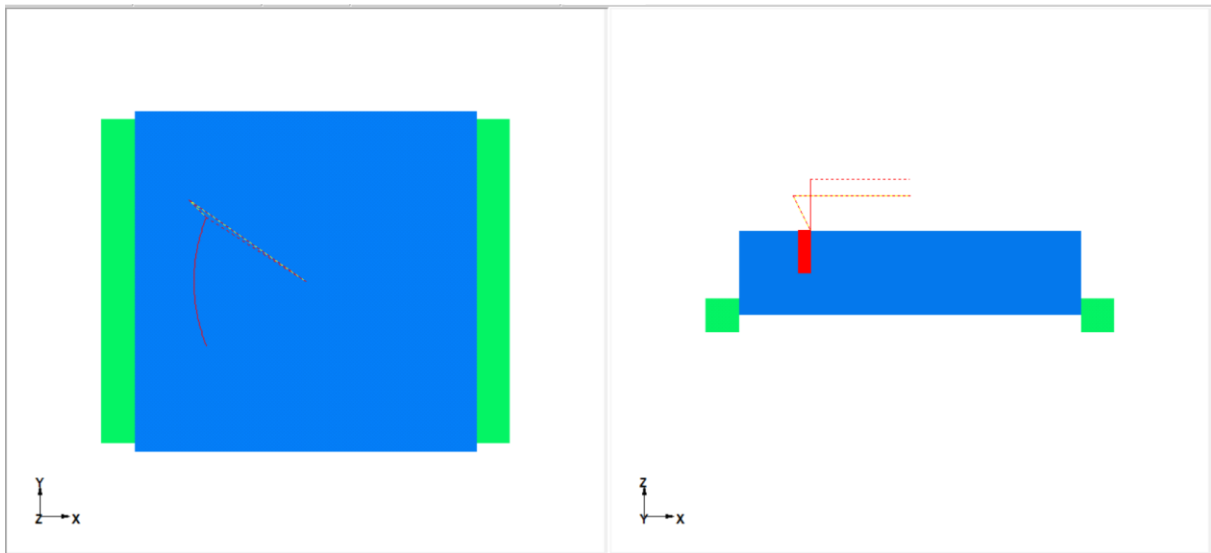


Ilustración 32. Simulación Ensayo C1.1 - R 100, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

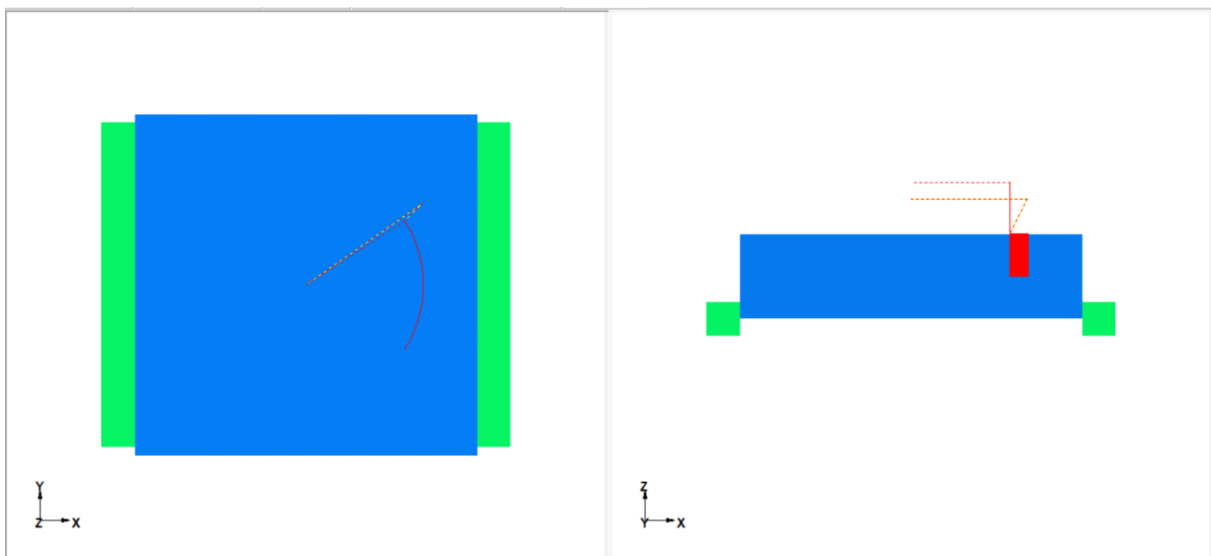


Ilustración 33. Simulación Ensayo C1.2 - R 70, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

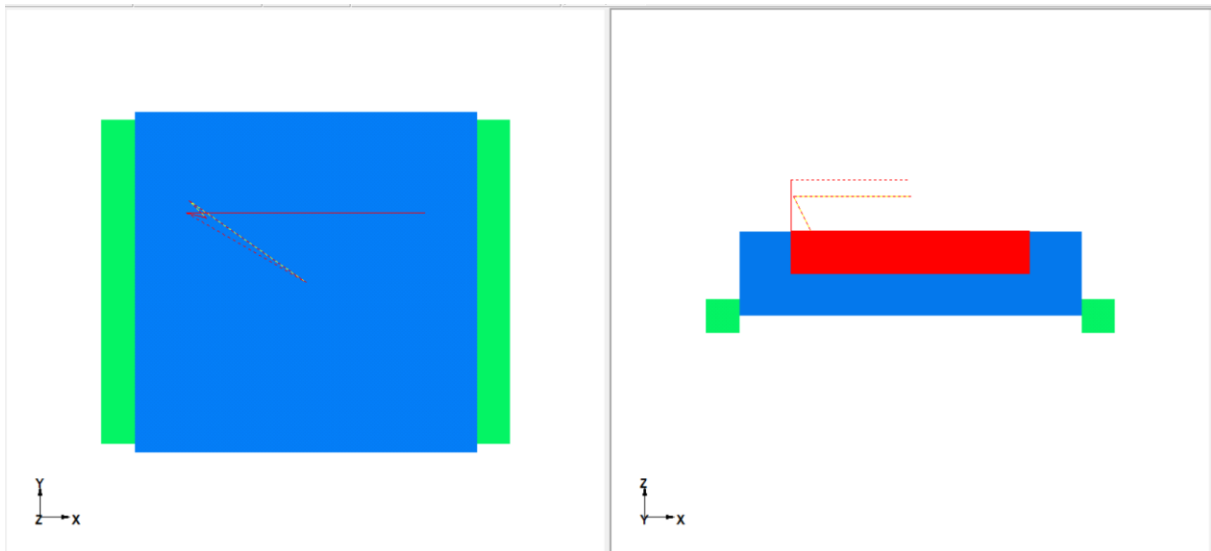


Ilustración 34. Simulación Ensayo C1.3 - R 0, Ángulo 90°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

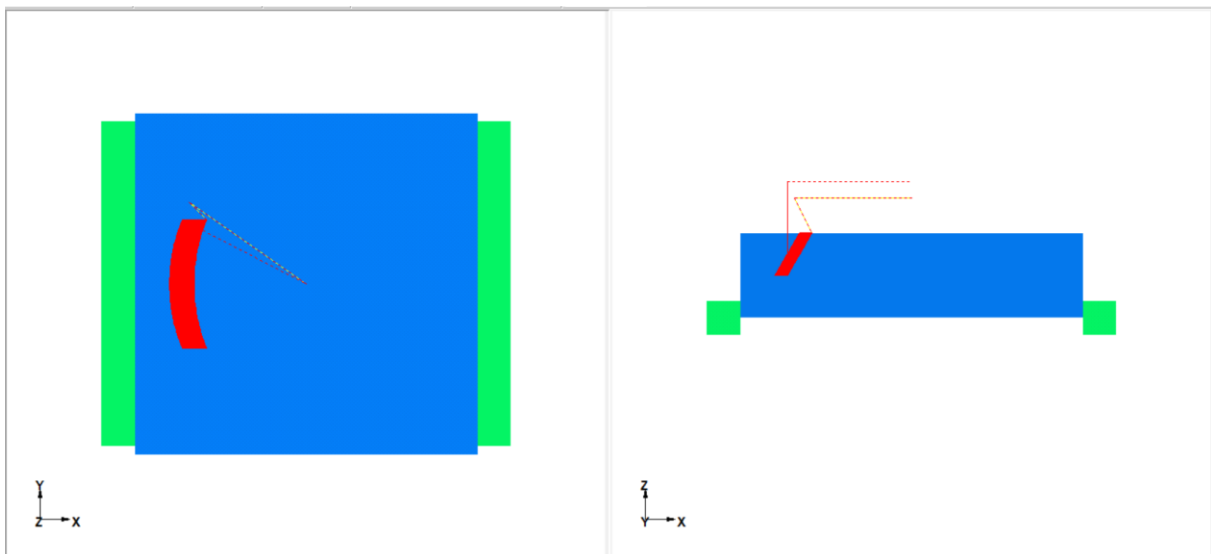


Ilustración 35. Simulación Ensayo C2.1 - R 100, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

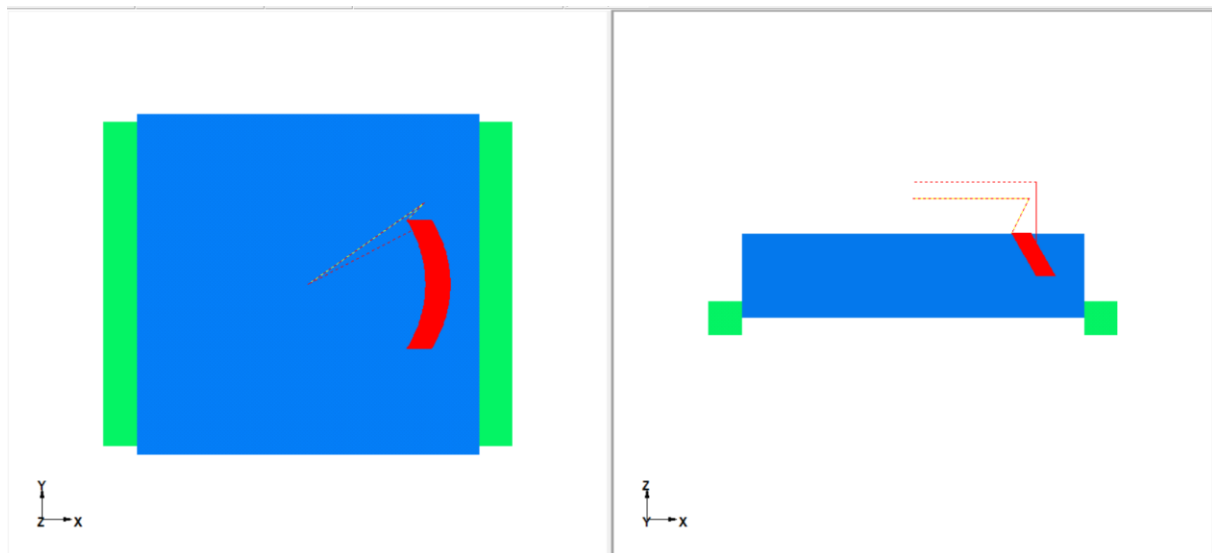


Ilustración 36. Simulación Ensayo C2.2 - R 70, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

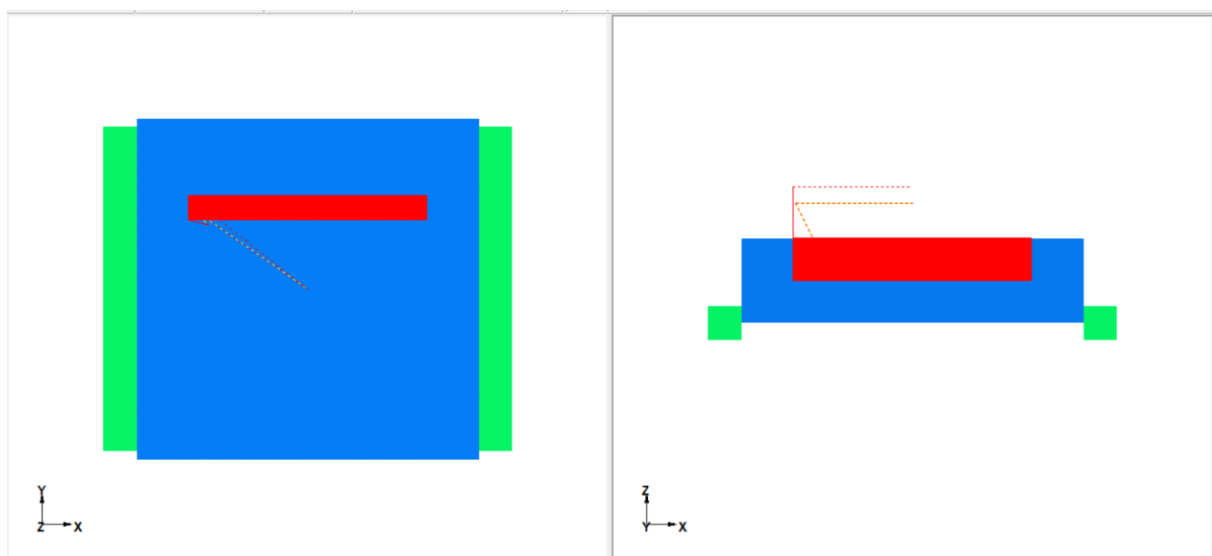


Ilustración 37. Simulación Ensayo C2.3 - R 0, Ángulo 60°, ΔZ 0.25; FUENTE: [Propia]

6.3.3. Preparación fresadora

Una vez hemos realizado las simulaciones y comprobado que no se producen fallos, procedemos a la preparación de la fresadora para la posterior ejecución de los ensayos.

En primer lugar, introducimos los programas de control numérico en la memoria de la fresadora y, como se ha mencionado antes, debemos eliminar las funciones de programación de la herramienta y de traslados de origen. Una vez los tengamos, les cambiaremos el nombre y guardaremos el archivo.

A continuación, debemos activar la toma de aire comprimido, y buscar el cero de referencia de la máquina. Esto lo realiza automáticamente la fresadora al pulsar en su pantalla la búsqueda de cero en X, Y y Z.

Seguido esto, debemos colocar la matriz, la chapa, el pisador y los tornillos y arandelas, para asegurar la correcta sujeción, sobre la mesa dinamométrica. Esto debe realizarse cada vez que usemos una chapa nueva, es decir, cuatro veces ya que realizamos tres ensayos en una misma chapa. En la siguiente ilustración podemos visualizar como quedaría:



Ilustración 38. Colocación del montaje; FUENTE: [Propia]

Al comienzo de cada ensayo deberemos realizar la toma de datos de las fuerzas a través del ordenador y del osciloscopio.

Tras la colocación del montaje y la preparación para la toma de datos, procedemos a buscar el cero pieza, y para ello, ajustaremos manualmente el punzón hasta llevarlo a la marca del pisador, diseñada especialmente para eso. Las referencias en los ejes X e Y se pueden tomar directamente visualizando, pero para la referencia del eje Z debemos tomarlo por choque, y para ello, activamos la medición de la fuerza en ese eje y cuando se registre un valor, se marca ese punto como referencia. Esto hay que realizarlo cada vez que cambiemos de chapa.

6.3.4. Ejecución ensayos y piezas obtenidas

Una vez tengamos realizados los pasos anteriores, ya está todo preparado y podemos proceder a ejecutar el programa. En las siguientes ilustraciones podemos ver el proceso de uno de los ensayos realizados para cada radio de curvatura, y algunas de las piezas obtenidas:

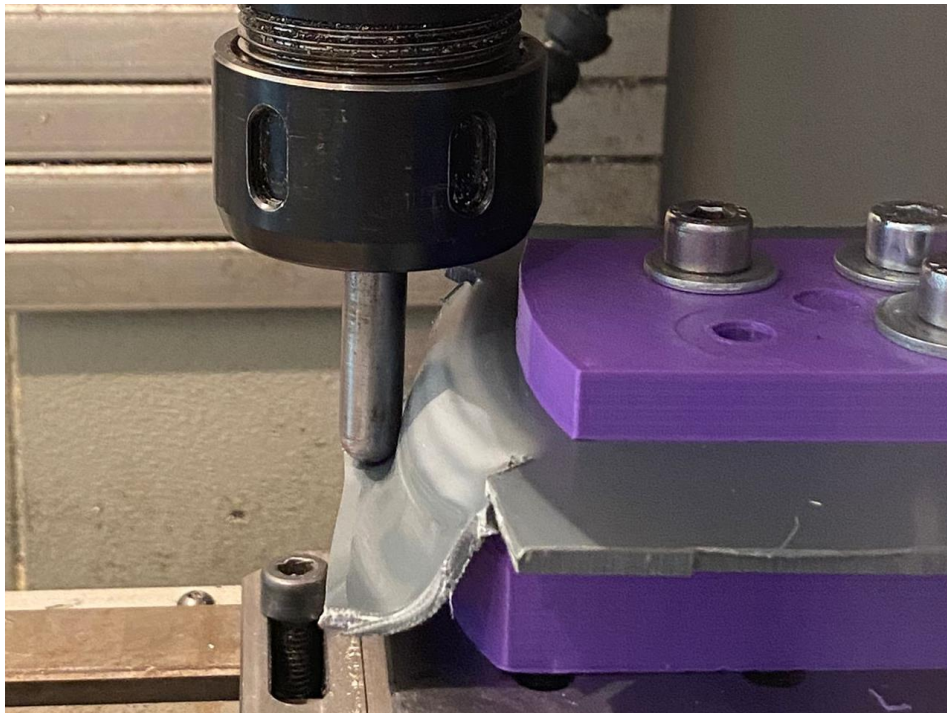


Ilustración 39. Ensayo experimental radio 100 mm; FUENTE: [Propia]

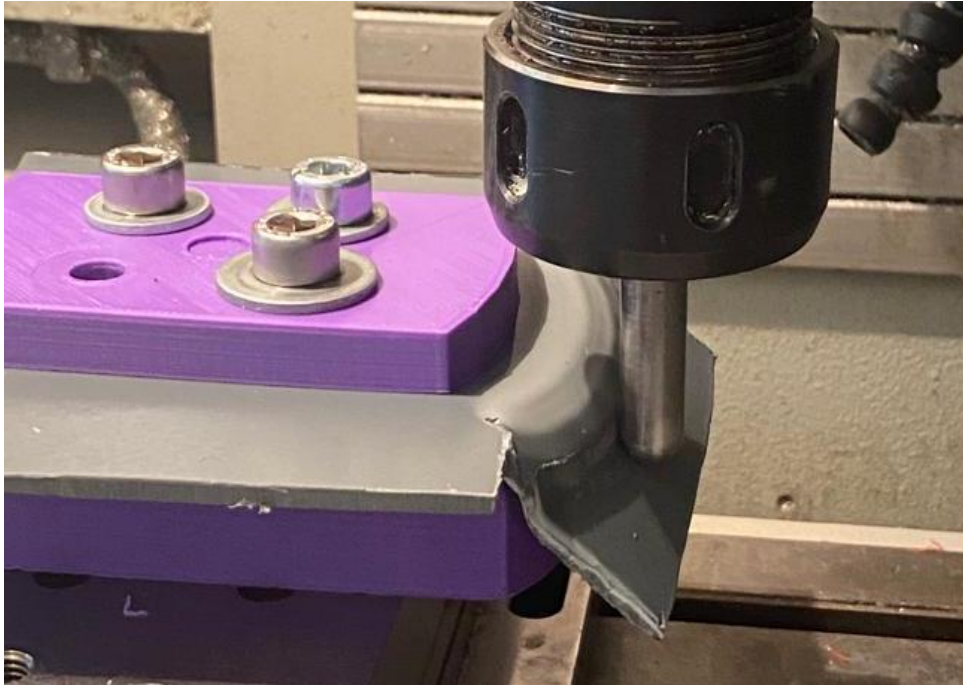


Ilustración 40. Ensayo experimental radio 70 mm; FUENTE: [Propia]



Ilustración 41. Ensayo experimental radio 0 mm; FUENTE: [Propia]



Ilustración 42. Chapa obtenida de Ángulo 90° y Δz 0.25 mm; FUENTE: [Propia]



Ilustración 43. Chapa obtenida de Ángulo 60° y Δz 0.25 mm; FUENTE: [Propia]

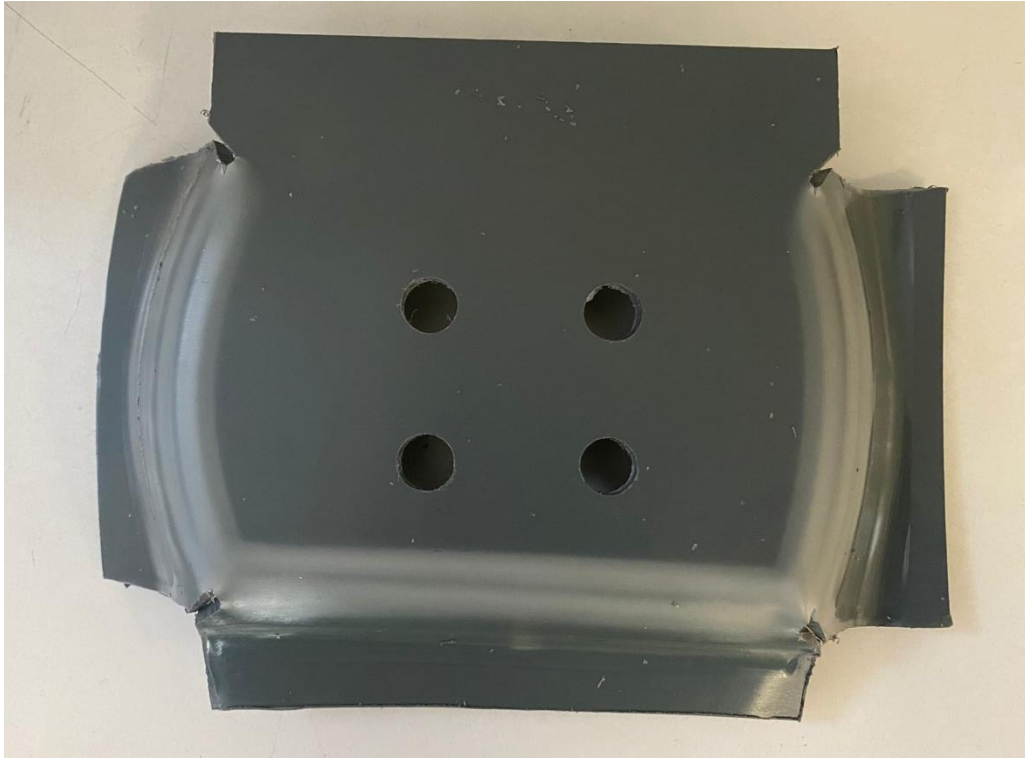


Ilustración 44. Chapa obtenida de Ángulo 90° y Δz 0.5 mm; FUENTE: [Propia]

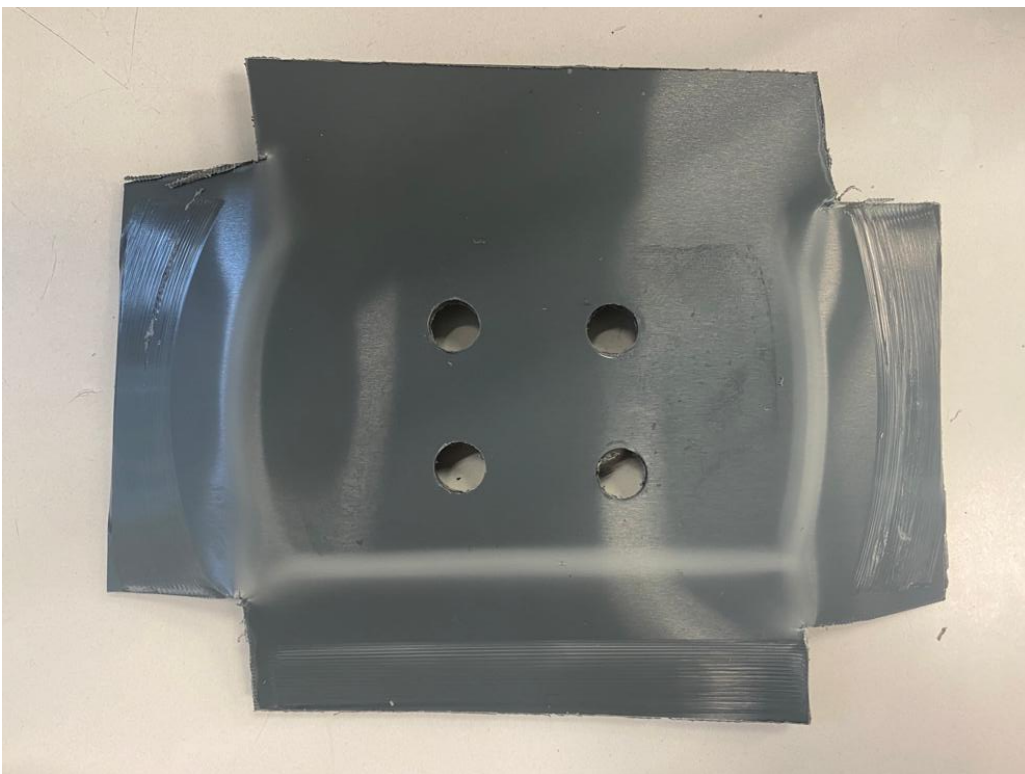


Ilustración 45. Chapa obtenida de Ángulo 60° y Δz 0.5 mm; FUENTE: [Propia]

7. RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se va a analizar los resultados experimentales obtenidos en los diferentes ensayos. Para ello, se estudiará la evolución de las fuerzas y la influencia de los factores elegidos, y seguidamente, los valores de los ángulos de recuperación elástica que se obtienen una vez llevados a cabo los ensayos.

Para facilitar el trabajo se ha utilizado una hoja de cálculo Excel con la que elaborar las gráficas y poder comparar los resultados entre los distintos ensayos para una mejor visualización.

7.1. Fuerzas de conformado

La medida de las fuerzas se ha obtenido mediante una mesa dinamométrica, una tarjeta computadora de datos y un ordenador con el software Daqview instalado, disponibles en el taller mecánico. Mediante la tarjeta computadora de datos se capta el valor de las fuerzas que se miden a través de la mesa dinamométrica, y a su vez, el ordenador recoge los datos y se guardan en un archivo de texto “.txt”. Una vez hecho esto, se pasan los datos a un archivo Excel, donde tendremos 20 datos por segundo.

En primer lugar, se va a analizar las fuerzas instantáneas y las fuerzas medias obtenidas en el ensayo C1.1, cuyos factores son un ángulo de 90°, una profundidad de paso (Δz) de 0.25mm y un radio de 100mm, y los valores de las fuerzas en el régimen permanente. Seguidamente, se realizará un análisis de los efectos principales en el que se pueda apreciar la influencia de los factores elegidos, y por último, se llevará a cabo una comparación entre los distintos resultados de las fuerzas medias obtenidas en los diferentes ensayos.

Para estudiar la evolución de las fuerzas, se hará distinción entre las fuerzas horizontales, correspondientes a los ejes X e Y, especificando si trata de fuerza principal o fuerza secundaria, y las fuerzas verticales, correspondientes al eje Z. Entendiendo como fuerza principal la fuerza normal al eje de doblado, y como fuerza secundaria, la paralela al eje de doblado.

Una vez tenemos las fuerzas instantáneas, las obtenidas directamente del archivo de texto “.txt”, calcularemos las fuerzas medias, referidas al valor medio de la fuerza en cada uno de los ciclos que se realizan en los ensayos. Para ello, necesitamos obtener el número de ciclos que se producen en cada ensayo y el tiempo tardado en realizar cada ciclo, por lo que, nos fijamos en el tiempo total tardado y la profundidad total a la que se ha llegado. El tiempo que tarda en ejecutar cada ciclo en un ensayo es el mismo en trayectorias rectas y curvas, ya que en las trayectorias curvas se ha ido desplazando el centro en vez de variar el radio de curvatura. Se ha calculado de la siguiente manera:

$$n^{\circ} \text{ ciclos} = \frac{Z_{total}}{\Delta Z} \quad (\text{Fórmula 5})$$

$$t \text{ ciclos} = \frac{T_{total}}{n^{\circ} \text{ ciclos}} \quad (\text{Fórmula 6})$$

Donde Z_{total} corresponde a 25 mm en el caso de las trayectorias curvas y 20 mm en el caso de la trayectoria recta, y ΔZ corresponde a la profundidad de pasada, que dependiendo del ensayo, será de 0.25mm o 0.5mm.

Para la representación de las fuerzas medias, se ha tomado valores absolutos ya que el signo no es de mucha utilidad, solo indica la dirección del empuje, y ésta depende de cómo se haya colocado la pieza sobre la fresadora.

Se ha procedido de la manera que se consideraba más idónea e intentando disminuir al máximo la distorsión, pero hay que tener en cuenta que pueden influir varios factores. Entre ellos se podrían destacar:

- La velocidad de avance del proceso, no es exactamente la introducida ya que el punzón pierde velocidad debido al rozamiento que pueda tener en cada pasada.
- Los ciclos pueden no estar perfectamente agrupados ya que pueden estar movidos unos milisegundos, lo que provocaría una pequeña distorsión.
- La chapa utilizada podría no haber sido perfectamente simétrica, lo cual también influiría.

7.1.1. Análisis de fuerzas obtenidas en el ensayo C1.1

En primer lugar nos centraremos en los resultados obtenidos en el ensayo C1.1, cuyos factores son un ángulo de 90° , una profundidad de pasada (ΔZ) de 0.25mm y un radio de curvatura de 100mm. A continuación, se mostrará la gráfica de fuerzas instantáneas o medidas frente al tiempo, y la gráfica de fuerzas medias frente a Z, en los ejes X, Y y Z.

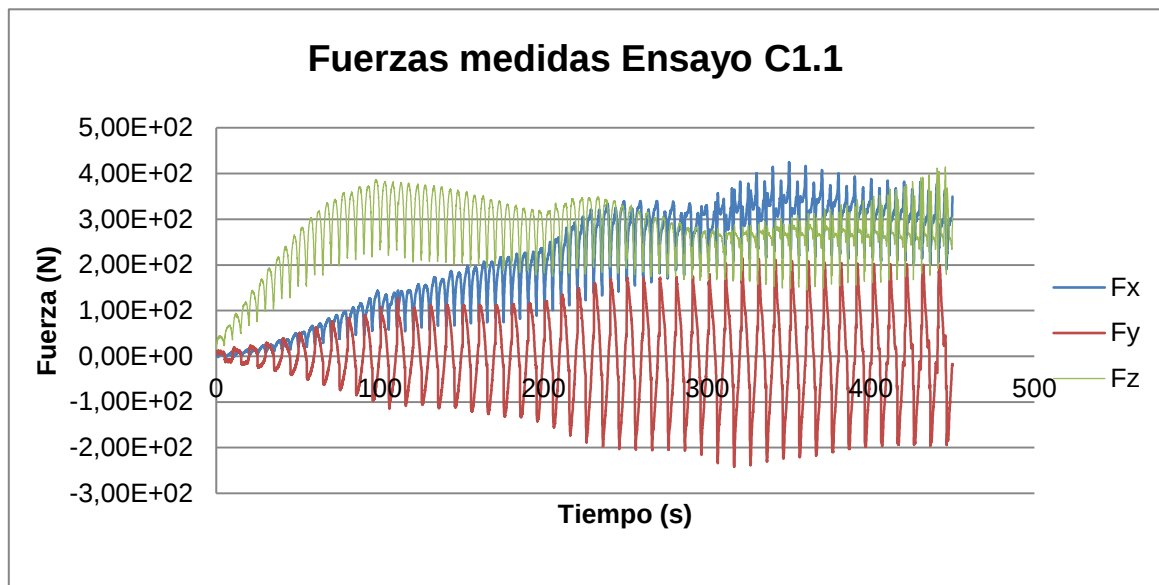


Ilustración 46. Fuerzas medidas Ensayo C1.1; FUENTE: [Propia]

Por un lado, centrándonos en el régimen permanente de las fuerzas horizontales, podemos ver que para este ensayo, la fuerza principal corresponde al eje X y la fuerza secundaria al eje Y. Por otro lado, analizando cada fuerza por separado, observamos que las fuerzas en el eje X van aumentando de manera constante hasta que se llega a un régimen permanente. Las fuerzas obtenidas en el eje Y tienen un comportamiento cíclico que va aumentando a la vez que en el eje X hasta un tiempo de 100 segundos aproximadamente, donde se comienzan a obtener unas fuerzas de menor valor y a crecer en menor medida. Ese comportamiento cíclico se corresponde con cada ciclo, es decir, cada pasada del punzón. Las fuerzas en el eje Z comienzan mucho mayores que las fuerzas en X e Y, esto es debido a que es necesario más presión en este eje para empezar a deformar la

chapa ya que el material tiende a recuperar su posición, aunque a partir de los 100 segundos aproximadamente, se empieza a tener un comportamiento más lineal, ya que la deformación es más constante.

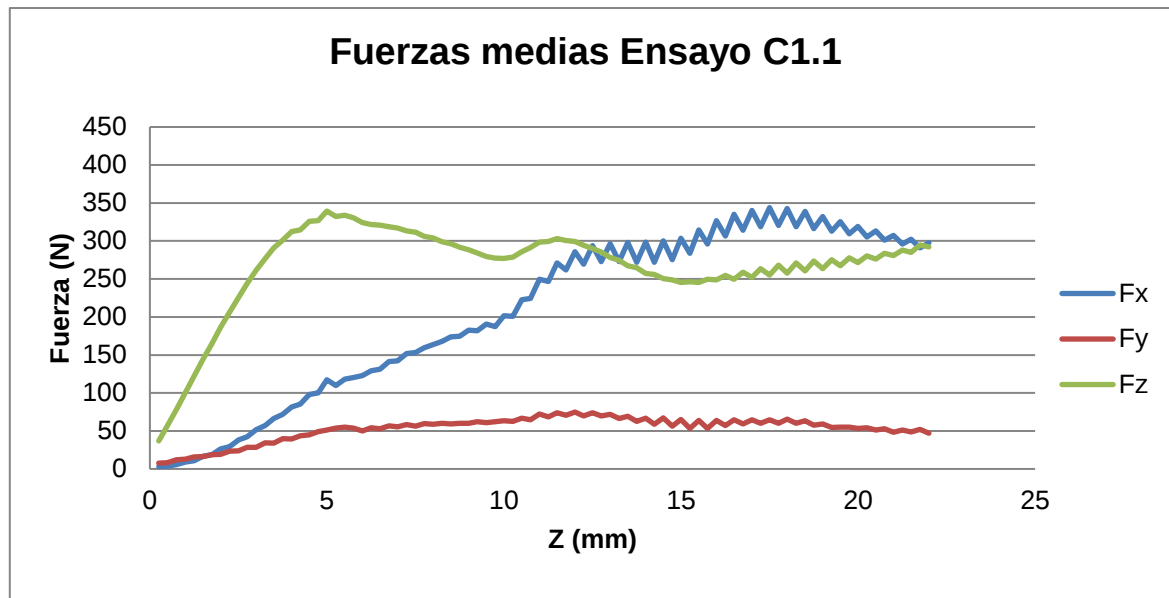


Ilustración 47. Fuerzas medias Ensayo C1.1; FUENTE: [Propia]

Para observar mejor la evolución representamos las fuerzas medias frente a Z, tomando los valores medios en cada ciclo producido a la misma cota Z. En general, vemos que las fuerzas tienen la misma tendencia que en la gráfica anterior. En el eje X, como hemos dicho anteriormente, aumenta de forma constante, hasta que llegar a una fuerza máxima de 350 Newton aproximadamente. En el eje Y comienza a aumentar de forma constante hasta unos 5 mm, y después comienza el régimen permanente, en el que se mantiene constante en torno a los 50 Newton. En el eje Z la fuerza aumenta considerablemente hasta 5 mm de profundidad, y a partir de los 15 mm comienza el régimen permanente, donde la fuerza se mantiene prácticamente constante entre 250 y 300 Newton.

Se ha seguido el mismo procedimiento para los demás ensayos, obteniendo gráficas con una tendencia muy similar. En próximos apartados se comentarán y compararán las fuerzas principales y las fuerzas verticales de todos los ensayos realizados agrupados por factores. Se ha despreciado la fuerza secundaria ya que

como podemos ver en las representaciones del ensayo C1.1, no se considera muy relevante para obtener conclusiones en comparación a la fuerza principal o vertical.

7.1.2. Fuerzas en el régimen permanente

Una vez analizados los resultados de las fuerzas del Ensayo C1.1, procedemos a obtener los valores medios de las fuerzas en régimen permanente, tanto para las fuerzas horizontales, que distinguiremos entre fuerza principal o fuerza secundaria, como para las fuerzas verticales.

Para ello, nos centramos en la gráfica y seleccionamos el tramo aproximado en el que los valores se mantienen constantes o aumentan con una tendencia constante, es decir, en la zona con un comportamiento aproximadamente lineal, y realizamos la media de ellos. Repetimos este procedimiento para todas las fuerzas horizontales y verticales de todos los ensayos efectuados, intentando escoger un tramo contenido entre los mismos valores de Z de todas las representaciones.

En la siguiente tabla podemos comparar los valores de las fuerzas principales, secundarias y verticales en régimen permanente obtenidas en los doce ensayos efectuados:

	F.Principal		F.Secundaria		F.Vertical
C1.1	Fx	320.064	Fy	61.459	281.786
C1.2	Fx	319.709	Fy	151.084	317.234
C1.3	Fy	333.844	Fx	89.806	237.467
C2.1	Fx	127.140	Fy	26.408	146.292
C2.2	Fx	134.753	Fy	12.111	156.008
C2.3	Fy	90.516	Fx	26.366	209.797
C3.1	Fx	381.128	Fy	101.910	312.478
C3.2	Fx	323.771	Fy	108.391	325.007
C3.3	Fy	361.956	Fx	121.149	361.431
C4.1	Fx	151.594	Fy	44.536	169.124
C4.2	Fx	158.416	Fy	42.814	182.482
C4.3	Fy	183.011	Fx	56.824	224.595

Tabla 11. Fuerzas principales, secundarias y verticales en régimen permanente.

Por un lado, podemos ver que en las fuerzas secundarias se obtienen valores bajos en comparación a las fuerzas principales y a las fuerzas verticales, es por ello que se decidió despreciarlas para realizar la comparación entre los distintos ensayos ya que no se consideran muy relevantes. Por el contrario, los resultados obtenidos en las fuerzas principales y verticales son más similares entre ellos.

Por otro lado, centrándonos en las fuerzas principales y secundarias, podemos apreciar que la mayoría de las fuerzas principales corresponden a las fuerzas producidas en el eje X, y la mayoría de las fuerzas secundarias corresponden a las producidas en el eje Y, excepto en los ensayos C1.3, C2.3, C3.3

y C4.3 que ocurre justo lo contrario. Analizando estos ensayos, vemos que esto es debido al único factor que cambia con respecto a los demás ensayos, el radio de curvatura, ya que éstos corresponden al tramo recto en el que el radio de curvatura tiene un valor de infinito.

7.1.3. Análisis de los efectos principales

Haciendo referencia a Medina Sánchez, G. [4], un efecto principal es el efecto de una variable independiente en una variable dependiente promediada, a través de los niveles de cualquier otra variable independiente. Los efectos principales son esencialmente el efecto general de un factor.

En este apartado se pretende realizar un estudio de efectos principales para determinar el efecto de cada factor sobre la variable de respuesta, en este caso, la fuerza, y el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Con este análisis podremos apreciar qué factores son los más influyentes sobre la fuerza principal y la fuerza vertical, y cuáles menos, y así, poder comparar las fuerzas según los factores más relevantes. Se analizarán por separado, los efectos de los factores sobre la fuerza principal y la fuerza vertical.

Anteriormente, en la sección “4. Diseño de experimentos” se realizó un diseño de experimentos DoE en el que se llevó a cabo un diseño Full Factorial definiendo los factores, niveles y respuestas. Una vez hecho esto, pudimos obtener la siguiente tabla con todas las combinaciones posibles, a lo que añadimos las fuerzas principales y verticales para realizar el análisis de efectos principales.

	R	Alfa	Δz	F.Principal	F.Vertical
C1.1	-1	-1	-1	320.064	281.786
C1.2	0	-1	-1	319.709	317.234
C1.3	1	-1	-1	333.844	237.467
C2.1	-1	1	-1	127.140	146.292
C2.2	0	1	-1	134.753	156.008
C2.3	1	1	-1	90.516	209.797
C3.1	-1	-1	1	381.128	312.478
C3.2	0	-1	1	323.771	325.007
C3.3	1	-1	1	361.956	361.431
C4.1	-1	1	1	151.594	169.124
C4.2	0	1	1	158.416	182.482
C4.3	1	1	1	183.011	224.595

Tabla 12. Combinación de ensayos experimentales.

Para una mejor visualización de la combinación de ensayos hay que tener en cuenta la tabla X, de Factores y niveles, mencionada anteriormente en la sección “4.2. Solución factores y niveles”.

En primer lugar, obtendremos el gráfico de efectos principales. El procedimiento a seguir para los análisis de cada fuerza sería obtener la media de la respuesta, en cada caso, la fuerza principal o vertical, para cada nivel (-1,0,1) de los tres factores (Alfa, Δz , R).

Una vez tengamos esto, podremos obtener los gráficos de las interacciones entre los factores para analizar la relación existente entre ellos. Esto consistiría en realizar también la media de la respuesta, en cada caso, la fuerza principal o vertical, pero combinando dos niveles de dos factores a la vez. Se analizan los niveles alto y bajo de un factor coincidiendo con el nivel alto y bajo de otro factor con el que se quiere ver la interacción. Las interacciones que se van a analizar serían R-Alfa, Δz -Alfa y R- Δz . A continuación, se presentan las gráficas para cada fuerza:

1. FUERZA PRINCIPAL

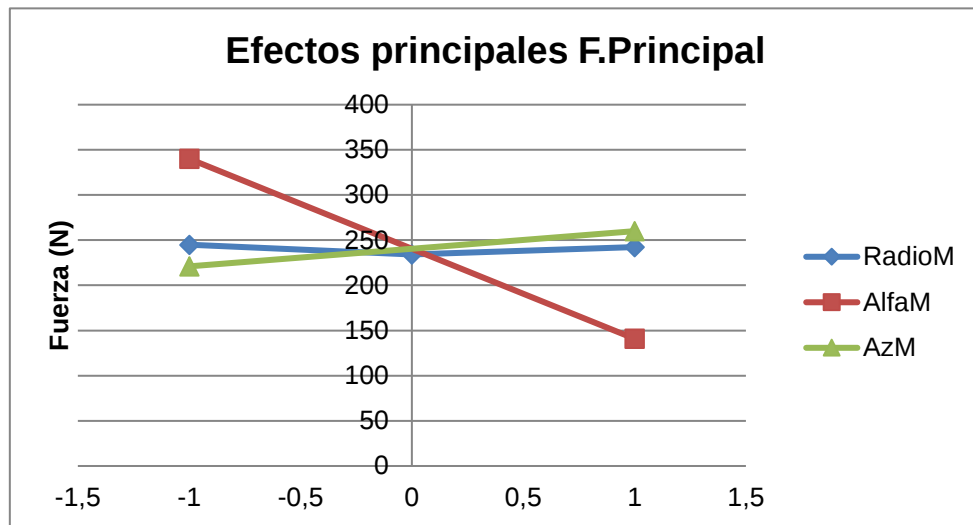


Ilustración 48. Efectos principales de la fuerza principal; FUENTE: [Propia]

Analizando los resultados obtenidos en el gráfico de efectos principales, podemos apreciar que el factor que más efecto tiene sobre la fuerza principal sería el ángulo alfa, a continuación le seguiría la profundidad de pasada, aunque apenas tiene efecto ya que es bastante menos acusado que el ángulo, y para terminar, el radio, que para los niveles que hemos escogido no tiene prácticamente efecto. Esto podemos deducirlo por las pendientes de las rectas.

Centrándonos en el factor con más influencia, el ángulo, vemos que tiene una pendiente negativa. Esto significa que al decrementar el ángulo de doblado la fuerza disminuye, es decir, cuando el ángulo es de 90° , que corresponde al nivel -1, la magnitud de la fuerza es mayor que cuando el ángulo es de 60° , que corresponde al nivel 1. Sin embargo, con la profundidad de pasada ocurre justo lo contrario, vemos que tiene una pendiente positiva. Esto significa que al incrementar la profundidad de pasada la fuerza aumenta, es decir, cuando Δz es 0.25 mm, que corresponde al nivel -1, la magnitud de la fuerza es menor que cuando Δz es 0.5 mm, que corresponde al nivel 1. Aunque para este último factor esto no es tan relevante ya que no tiene una gran pendiente.

A continuación, se presentan los gráficos de las interacciones entre los factores:

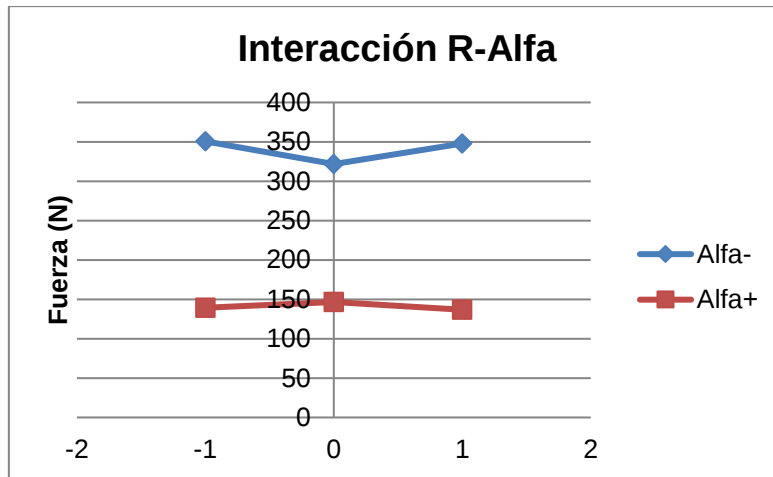
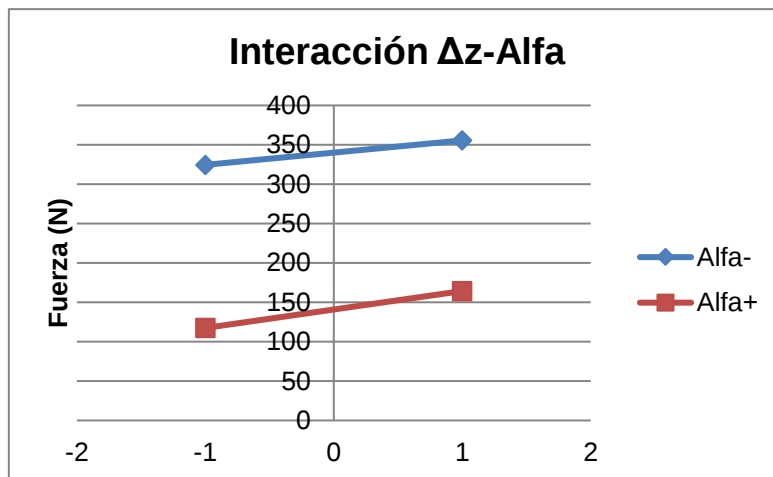
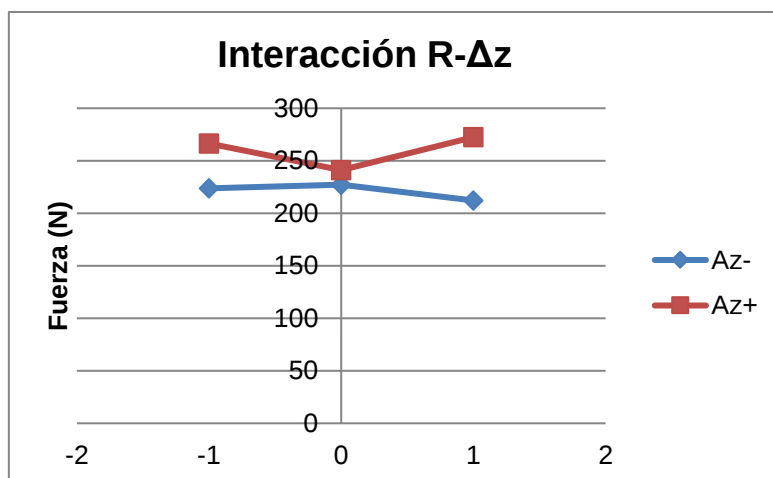


Ilustración 49. Interacción Radio-Alfa de fuerza principal; FUENTE: [Propia]

Ilustración 50. Interacción Δz -Alfa de fuerza principal; FUENTE: [Propia]Ilustración 51. Interacción Radio- Δz de fuerza principal; FUENTE: [Propia]

Como podemos ver, apenas hay interacción entre los factores ya que no se cruzan ni tienden a cruzarse, por lo que, no interaccionan entre sí, no están correlacionados. Tienen un comportamiento cuasiparalelo.

2) FUERZA VERTICAL

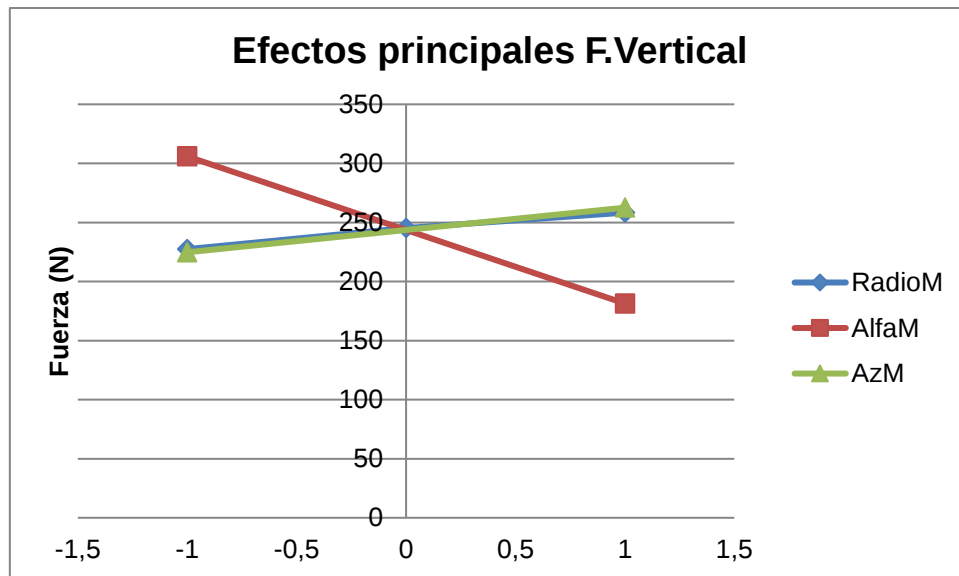


Ilustración 52. Efectos principales de la fuerza vertical; FUENTE: [Propia]

Analizando este gráfico de efectos principales de la fuerza vertical, podemos apreciar que obtenemos resultados muy similares a los obtenidos anteriormente en el gráfico de fuerzas principales. El factor que más efecto tiene sería el ángulo de doblado, a continuación le seguiría la profundidad de pasada, y finalmente, el radio de curvatura. Sin embargo, en este caso, el radio de curvatura si causa un pequeño efecto sobre la fuerza vertical, aunque al igual que la profundidad de pasada, no son muy relevantes en comparación a la influencia del ángulo alfa.

Centrándonos en el radio de curvatura, podemos observar que tiene una pendiente positiva, por lo que, la fuerza aumenta a medida que el radio de curvatura disminuye, ya que en el nivel -1 tenemos un radio de 100 mm, en el nivel 0 de 70 mm, y en el nivel 1 de valor infinito.

A continuación, se presentan los gráficos de las interacciones entre los factores:

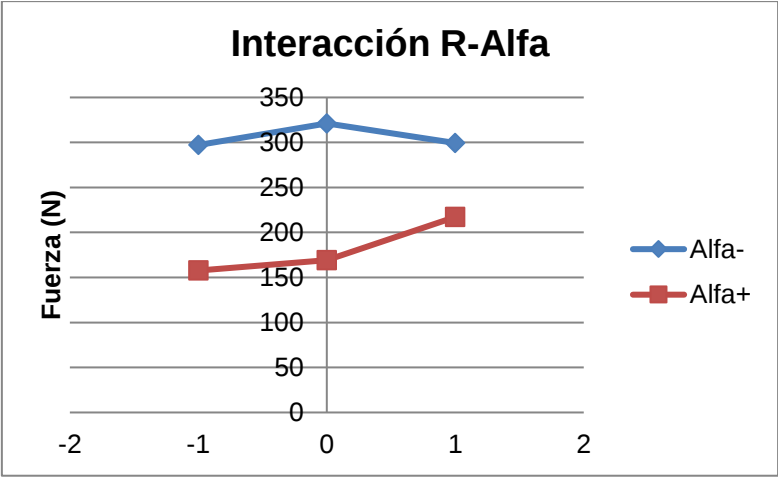


Ilustración 53. Interacción R-Alfa de fuerza vertical; FUENTE: [Propia]

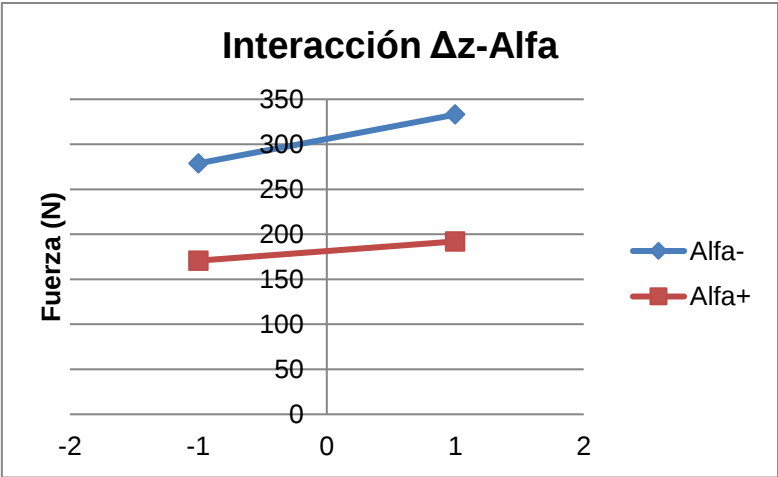


Ilustración 54. Interacción Δz-Alfa de fuerza vertical; FUENTE: [Propia]

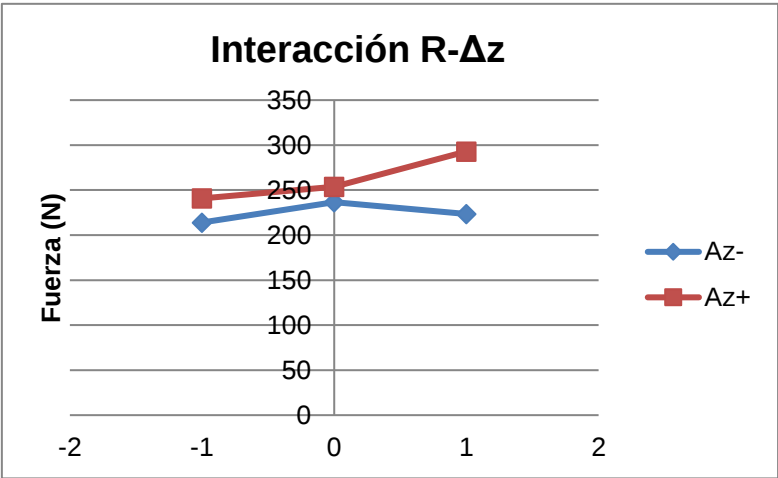


Ilustración 55. Interacción R-Δz de fuerza vertical; FUENTE: [Propia]

Como podemos ver, al igual que obtuvimos en el caso de la fuerza principal, apenas hay interacción entre los factores, por lo que, son independientes, no están correlacionados. Tienen un comportamiento cuasiparalelo.

Analizando de forma general los resultados obtenidos, nos vamos a centrar en el ángulo de doblado y en la profundidad de pasada ya que son los factores de más efecto.

En cuanto a la profundidad de pasada, cuanto mayor sea ΔZ , mayor será el volumen de deformación, por lo que, se obtienen fuerzas de mayor magnitud ya que se intenta deformar más cantidad de material.

En cuanto al ángulo alfa, a mayor ángulo de doblado, mayor será el área de contacto entre el punzón y la lámina de PVC, por lo que, la superficie a deformar es mayor, lo que nos lleva a obtener fuerzas de mayor magnitud.

Superficie de contacto para un ángulo de 90°	Superficie de contacto para un ángulo de 60°
 Ilustración 56. Superficie de contacto 90°; FUENTE: [Propia]	 Ilustración 57. Superficie de contacto 60°; FUENTE: [Propia]

7.1.4 Comparación de los resultados de los ensayos efectuados

Una vez analizados los efectos de los factores elegidos sobre las fuerzas, procedemos con los resultados obtenidos al realizar los diferentes ensayos. Se ha dividido estos resultados en dos categorías, por un lado, se compararán variando el radio de curvatura, y por otro lado, variando el ángulo de deformación y la profundidad de pasada. A su vez, se analizará por separado las fuerzas principales y las fuerzas verticales, ya que se decidió despreciar las fuerzas secundarias al no considerarse muy relevantes.

➤ COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO EL RADIO DE CURVATURA

En este apartado se mostrarán y analizarán los resultados de las fuerzas variando el radio de curvatura, 100 mm, 70 mm o valor infinito, y se mantendrá fijo en cada gráfica el valor del ángulo de deformación y la profundidad de pasada.

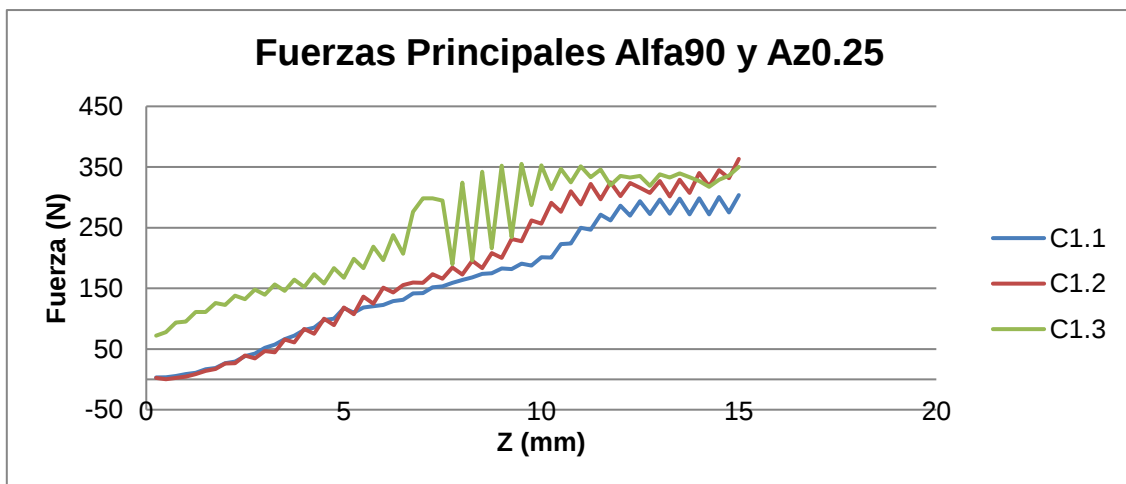


Ilustración 58. Fuerzas principales Alfa90° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]

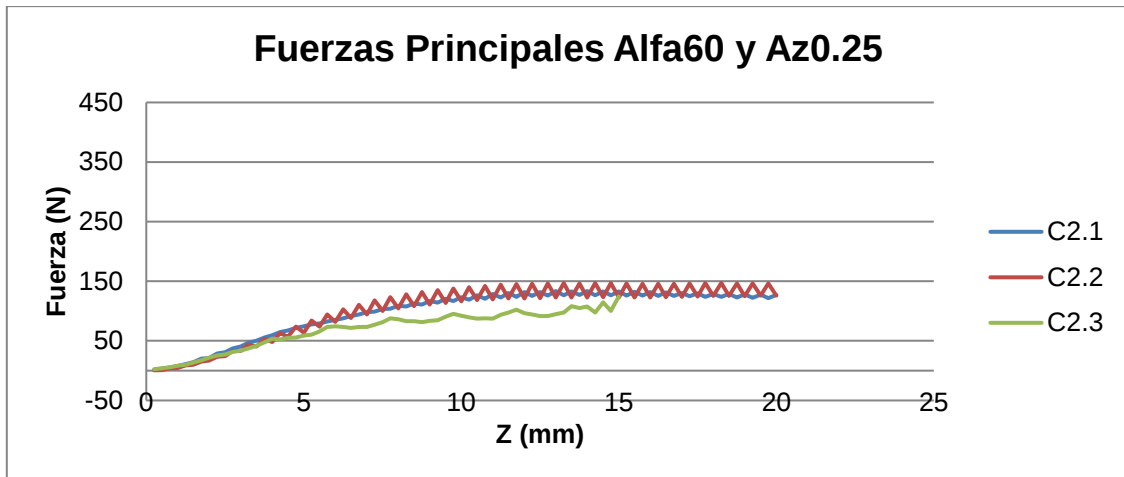


Ilustración 59. Fuerzas principales Alfa60° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]

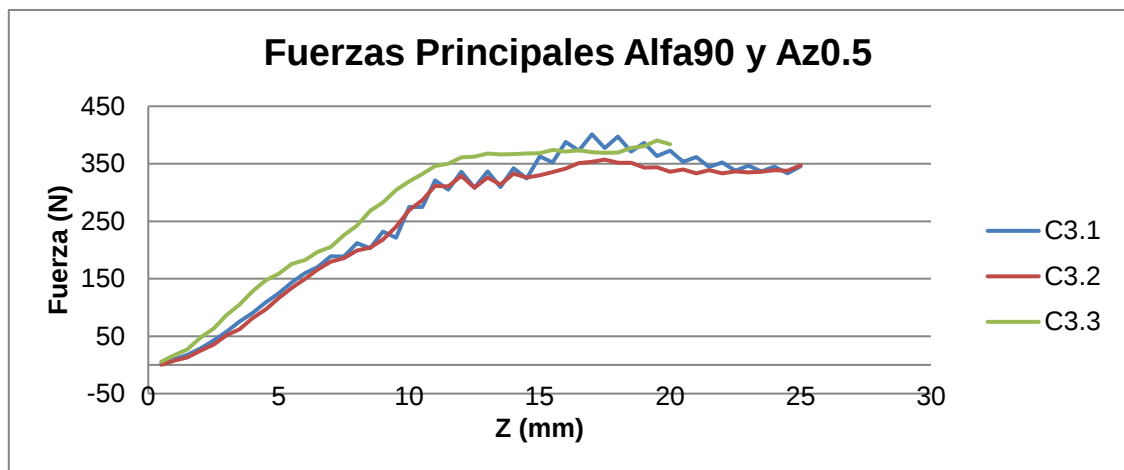


Ilustración 60. Fuerzas principales Alfa 90° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]

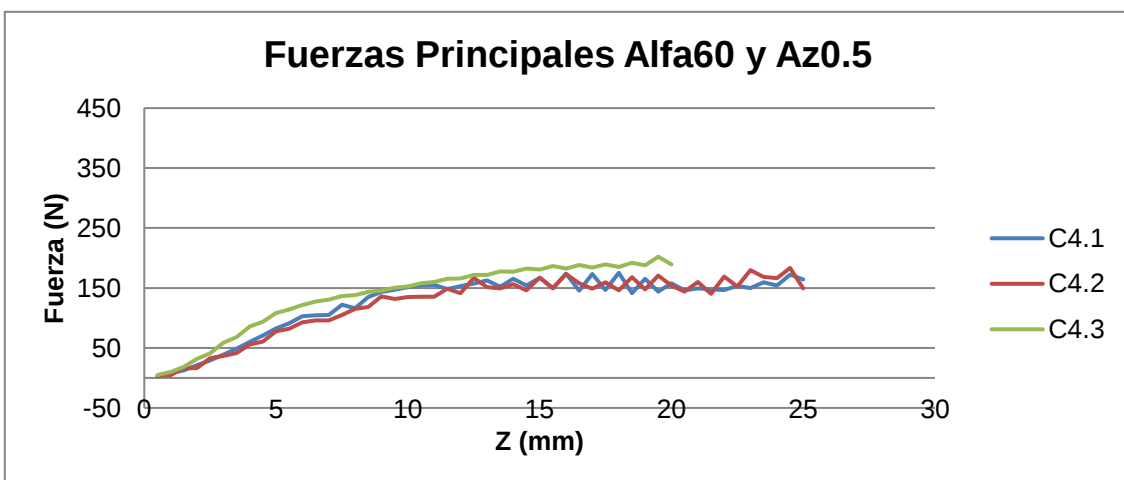


Ilustración 61. Fuerzas principales Alfa60° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]

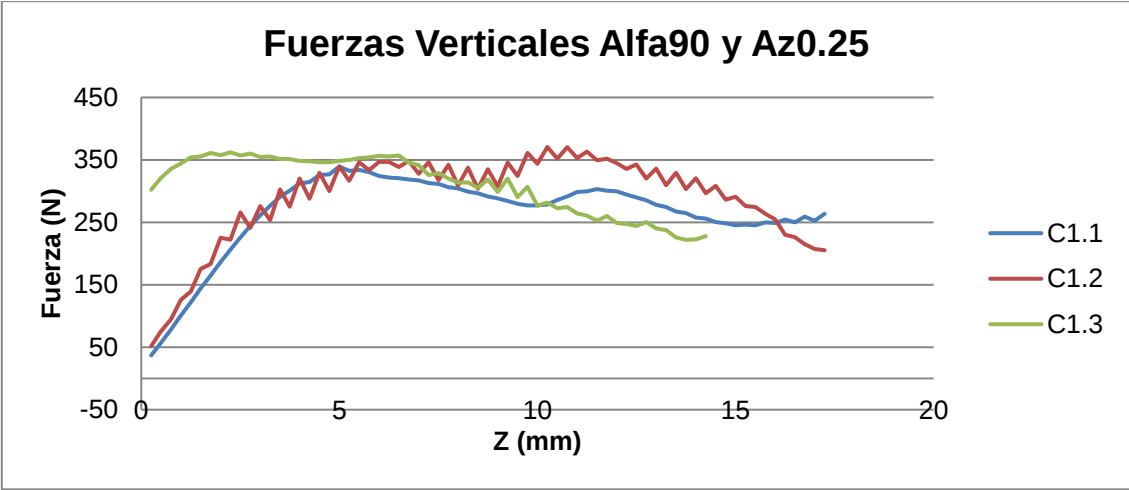


Ilustración 62.Fuerzas verticales Alfa90° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]

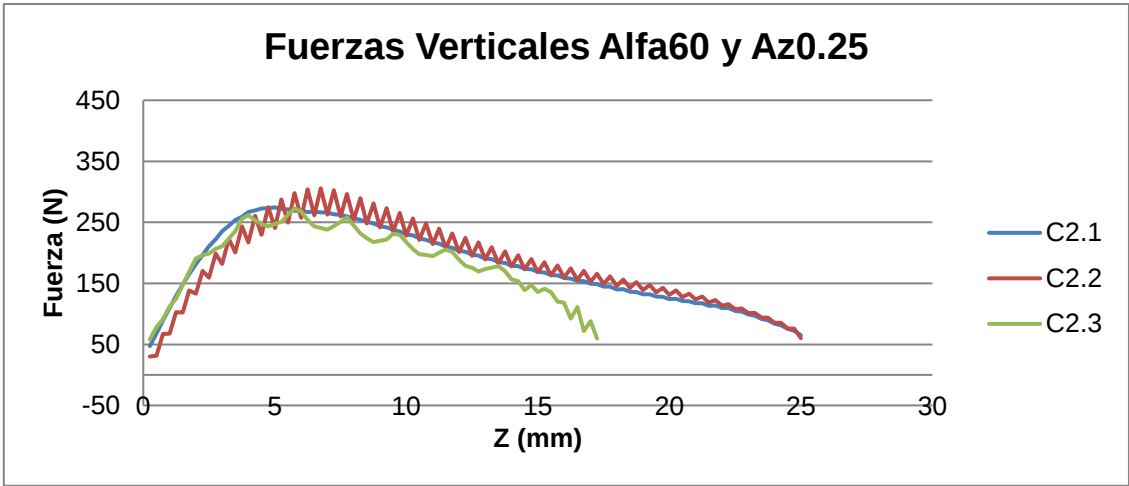


Ilustración 63. Fuerzas verticales Alfa60° y Az0.25mm; FUENTE: [Propia]

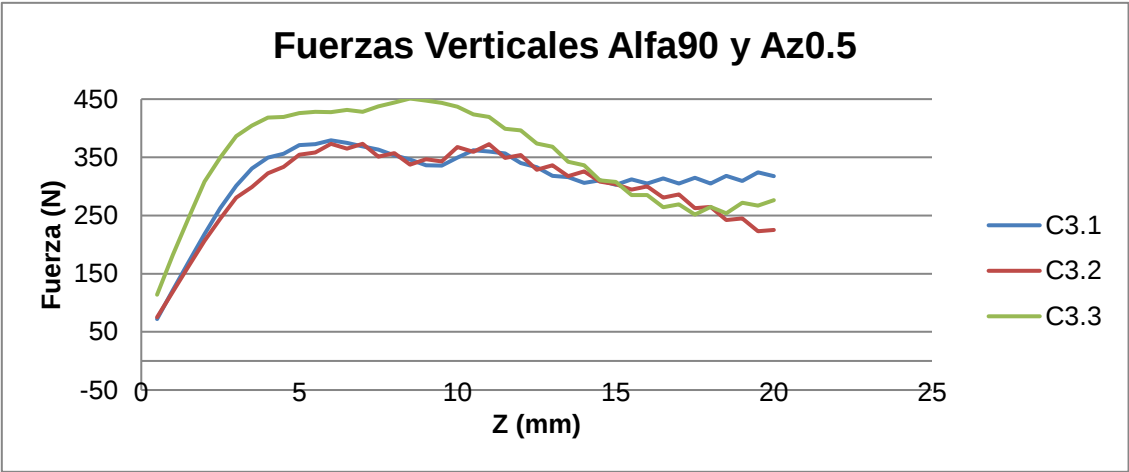


Ilustración 64. Fuerzas verticales Alfa90° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]

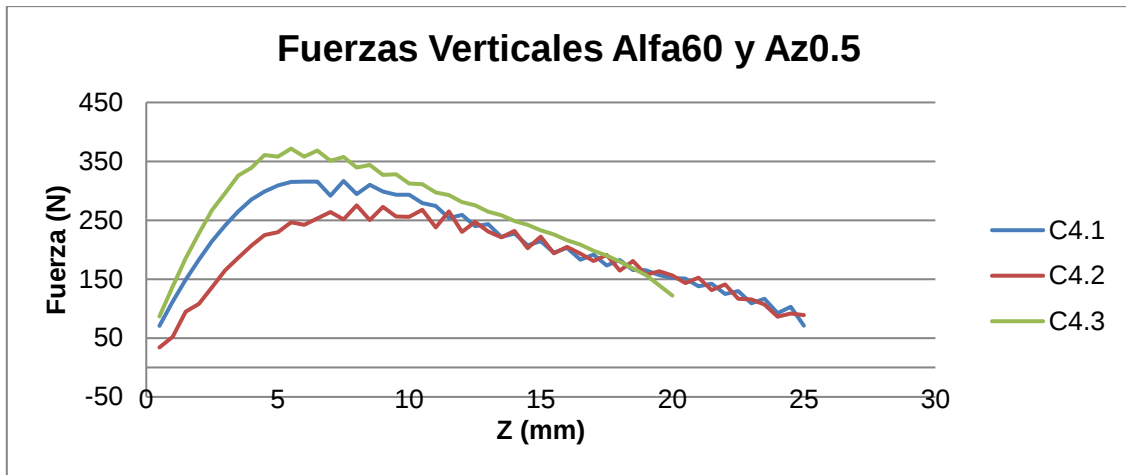


Ilustración 65. Fuerzas verticales Alfa60° y Az0.5mm; FUENTE: [Propia]

Tal y como podemos ver, para unas mismas condiciones de ángulo de deformación y profundidad de pasada, el factor del radio de curvatura no tiene un efecto significativo en las fuerzas a nivel general, siguen una tendencia muy similar entre ellas. Cabe destacar que era lo esperado ya que fue una conclusión obtenida al realizar el análisis de los efectos principales.

Sin embargo, comparando las fuerzas principales y verticales, podemos apreciar que las fuerzas principales van aumentando de manera constante hasta llegar a un régimen permanente, pero en menor medida que las fuerzas verticales, ya que éstas comienzan con magnitudes mucho mayores hasta que llegan a un máximo y después, van decreciendo. Esto es debido a que en el eje Z es necesario más presión para empezar a deformar la lámina de PVC ya que el material tiende a recuperar su posición.

➤ COMPARACIÓN DE RESULTADOS VARIANDO EL ÁNGULO DE DOBLADO Y LA PROFUNDIDAD DE PASADA

Como en el apartado anterior se observa que el efecto del radio es poco significativo, a continuación, para una mejor visualización de los resultados, se va a comparar el efecto del ángulo de deformación y de la profundidad de pasada para los ensayos realizados con un radio de curvatura de 100 mm.

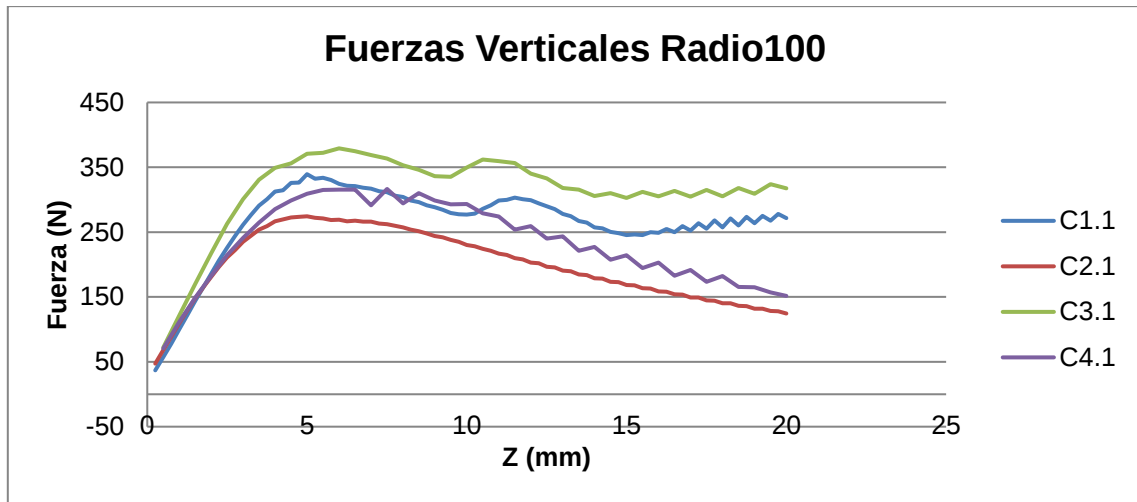


Ilustración 66. Fuerzas verticales R100; FUENTE: [Propia]

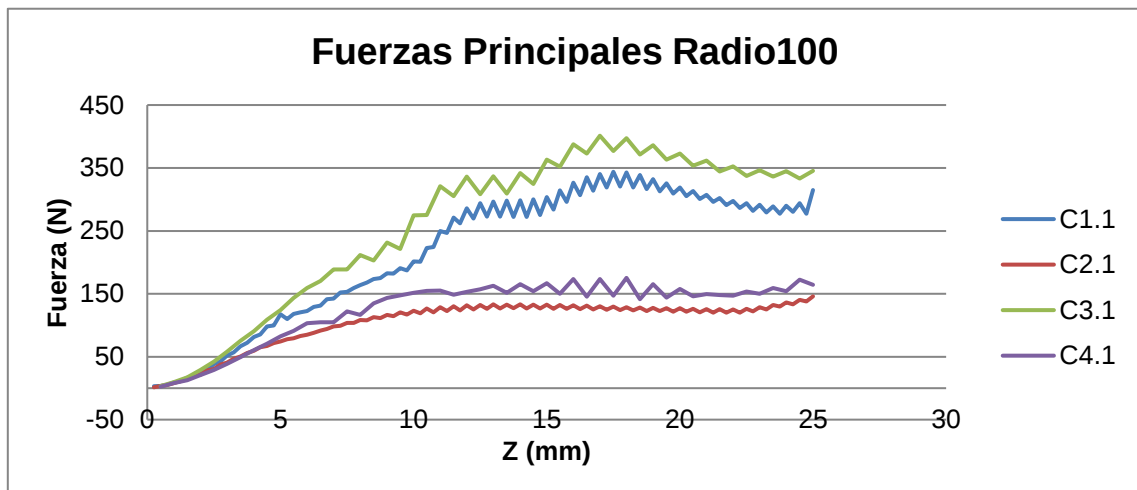


Ilustración 67. Fuerzas principales R100; FUENTE: [Propia]

Por un lado, podemos ver como para los ensayos cuyo ángulo de doblado es de 90° , C1.1 y C3.1, se obtienen valores de fuerzas mayores que en los ensayos cuyo ángulo de doblado es de 60° , C2.1 y C4.1.

Por otro lado, para un mismo ángulo de doblado, los ensayos cuya profundidad de pasada es mayor, de 0.5 mm, se obtienen fuerzas mayores que los ensayos cuya profundidad de pasada es de 0.25 mm. Para ello, comparamos los ensayos C3.1, con ΔZ 0.5, y C1.1, con ΔZ 0.25, que mantienen un ángulo de 90° , y los ensayos C4.1, con ΔZ 0.5, y C2.1, con ΔZ 0.25, que mantienen un ángulo de 60° .

Por último, comparando las fuerzas principales y verticales de forma general, podemos apreciar que ocurre lo mismo que en el caso de las fuerzas comparadas variando el radio de curvatura, ya que las fuerzas principales van aumentando de manera constante, y las fuerzas verticales comienzan con magnitudes mucho mayores y luego se produce un decrecimiento.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en el análisis de efectos principales y son lógicos, puesto que a mayor ángulo y mayor profundidad de pasada, el volumen de la lámina deformada es mayor, con lo cual, las fuerzas también serán mayores.

7.2. Formabilidad: Ángulo de recuperación elástica

La recuperación elástica es un fenómeno que se produce en un elemento deformado después de retirar la carga externa, ya que el material intenta recuperar su forma original. En este caso, se produce en la lámina de PVC que ha sido deformada bajo la fuerza del punzón que sigue la trayectoria definida.

En este apartado se pretende comparar los ángulos que se aspiraban conseguir, en nuestro caso, se trata de ángulos de doblado de 90° o 60° , con los finalmente obtenidos, y analizar los ángulos de recuperación elástica.

Para ello, se han realizado tres medidas del ángulo finalmente obtenido para cada ensayo con un goniómetro disponible en el taller mecánico, y seguidamente, se ha calculado la media de todos ellos.

	Ángulo 1	Ángulo 2	Ángulo 3	ÁnguloMedio
C1.1	44.30	34.15	46.30	41.58
C1.2	55.25	52.1	58.15	55.17
C1.3	39.15	38.45	36.35	37.98
C2.1	15.30	17.15	18.20	16.88
C2.2	17.35	18.45	18.05	17.95
C2.3	5	6.05	6.10	5.72
C3.1	41.25	39.30	39.15	39.90
C3.2	42.15	44.30	45.45	43.97
C3.3	30.05	34.10	32.15	32.10
C4.1	17.05	15.2	15.3	15.85
C4.2	17.15	15.25	18.05	16.82
C4.3	4	6.15	5.10	5.08

Tabla 13. Ángulos medidos en piezas deformadas.

Una vez hecho esto, procedemos a calcular el ángulo de recuperación elástica para cada ensayo:

$$\text{Áng. Recuperación elástica} = \text{Ángulo de doblado} - \text{Ángulo Medio}$$

(Fórmula 7)

A partir de esta fórmula podemos obtener la tabla que se muestra a continuación con todas las combinaciones de los ensayos, ángulo medio y ángulo de recuperación elástica:

	R	Alfa	Δz	ÁnguloMedio	Áng. Recuperación elástica
C1.1	-1	-1	-1	41.58	48.42
C1.2	0	-1	-1	55.17	34.83
C1.3	1	-1	-1	37.98	52.02
C2.1	-1	1	-1	16.88	43.12
C2.2	0	1	-1	17.95	42.05
C2.3	1	1	-1	5.72	54.28
C3.1	-1	-1	1	39.90	50.10
C3.2	0	-1	1	43.97	46.03
C3.3	1	-1	1	32.10	57.90
C4.1	-1	1	1	15.85	44.15
C4.2	0	1	1	16.82	43.18
C4.3	1	1	1	5.08	54.92

Tabla 14. Ángulos de recuperación elástica en piezas deformadas.

Por un lado, podemos observar que para una misma profundidad de pasada, la recuperación elástica es muy similar entre el ángulo de doblado de 90° y el de 60°, no se aprecia ninguna relación. Sin embargo, para un mismo ángulo de doblado, a mayor profundidad de pasada, de 0.5 mm, mayor es la recuperación elástica. Esto podemos apreciarlo al comparar, por ejemplo, el ensayo C1.1 de ángulo 90° y ΔZ 0.25 mm con el ensayo C3.1 de ángulo 90° y ΔZ 0.5 mm. Además, si nos centramos en los resultados obtenidos en el ángulo de deformación de 60°, podemos ver que la profundidad de pasada no genera tanto efecto como en el ángulo de deformación de 90° ya que se obtienen ángulos de recuperación elástica más similares.

Por otro lado, si nos fijamos en los resultados obtenidos según los radios de curvatura, podemos percibir que con un radio de curvatura de valor infinito, siempre se obtiene mayor ángulo de recuperación elástica que los realizados en las

superficies con radio de curvatura, independientemente del ángulo y de la profundidad de pasada. En cuanto a los tramos con superficie curva, vemos que se obtienen mayores ángulos de recuperación elástica en los ensayos realizados con un ángulo de doblado de 100 mm y después en los de 70 mm, aunque no existe gran diferencia entre los valores. Esto podemos apreciarlo al comparar, por ejemplo, el ensayo C1.1 de radio 100 mm, el C1.2 de radio 70 mm y el C1.3 de radio con valor infinito.

Para una mejor visualización de los efectos de cada factor sobre el ángulo de recuperación elástica, se va a realizar un análisis de efectos principales. Para ello, seguimos el mismo procedimiento que en la sección “7.1.3 Análisis de los efectos principales”, pero en este caso, la variable de respuesta sería el ángulo de deformación elástica.

A continuación se muestra el gráfico de efectos principales:

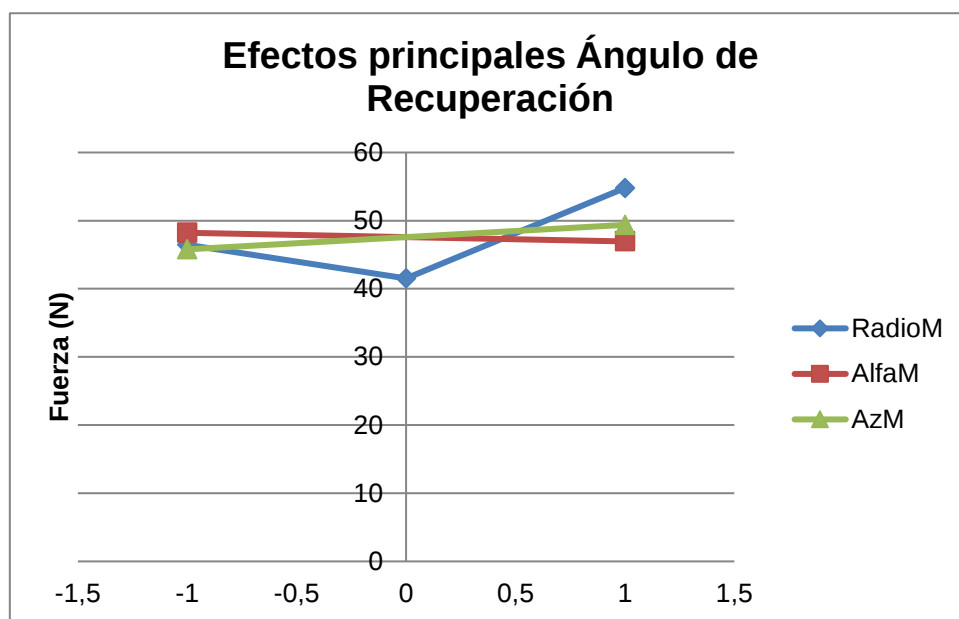


Ilustración 68. Efectos principales del ángulo de recuperación; FUENTE: [Propia]

Analizando los resultados obtenidos en el gráfico de efectos principales, podemos apreciar que realmente no hay ningún factor que afecte de forma muy relevante. El radio de curvatura sería el factor que más afecta al ángulo de

recuperación elástica, después le seguiría la profundidad de pasada, aunque con poco efecto, y por último, el ángulo de doblado, que no tiene prácticamente efecto.

La profundidad de pasada tiene pendiente positiva, por lo que, como hemos mencionado anteriormente, con una mayor profundidad de pasada, mayor será el ángulo de deformación elástica. El ángulo de doblado apenas tiene pendiente, por lo que, no causa ningún efecto. En cuanto al radio de curvatura, es un poco más complejo, pero podemos apreciar que los ángulos de recuperación elástica que se obtienen en los ensayos con radio de curvatura de valor infinito, que corresponde al nivel 1, son mayores que los obtenidos con radio de 100 mm, que corresponden al nivel -1, y éstos a su vez, también son mayores que los realizados con radio de 70 mm, que corresponden al nivel 0.

A continuación se presentan los gráficos de las interacciones entre los factores:

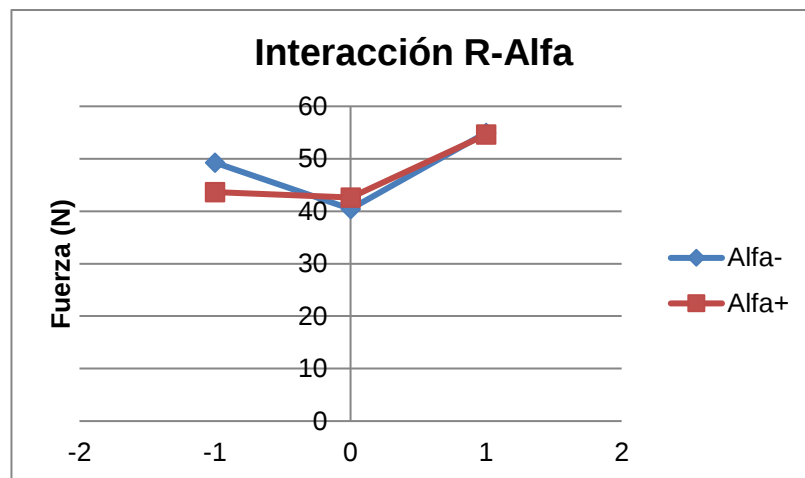
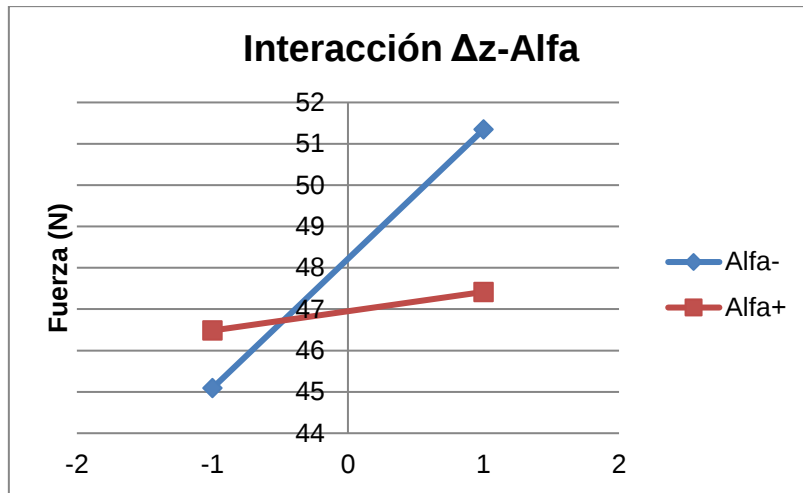
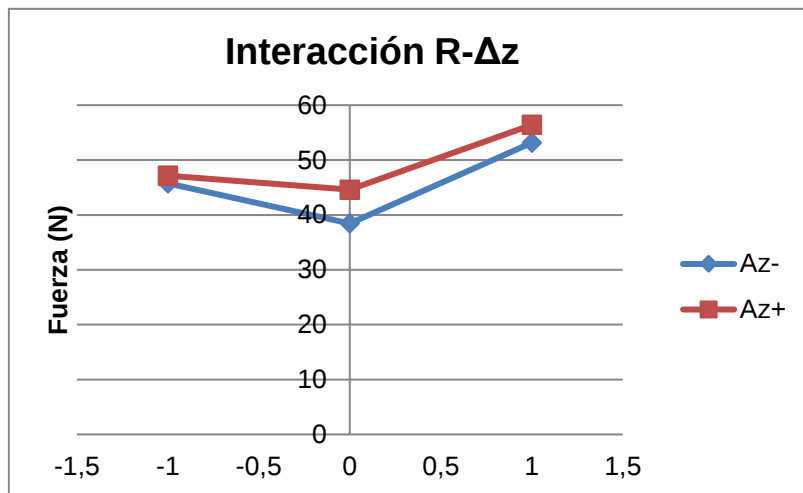


Ilustración 69. Interacción R-Alfa del ángulo de recuperación; FUENTE: [Propia]

Ilustración 70. Interacción Δz -Alfa del ángulo de recuperación elástica; FUENTE: [Propia]Ilustración 71. Interacción R- Δz del ángulo de recuperación elástica; FUENTE: [Propia]

Como podemos ver, si hay interacción entre el radio de curvatura y el ángulo de doblado, y entre la profundidad de pasada y el ángulo de doblado, por lo que, estarían correlacionados. Sin embargo, no existe interacción entre el radio de curvatura y la profundidad de pasada ya que no se cruza, por lo que, no están correlacionados.

7.3. Desgaste de matriz y pisador

A continuación se muestra una comparativa, entre el antes y el después de haber realizado los ensayos, de la matriz y el pisador:

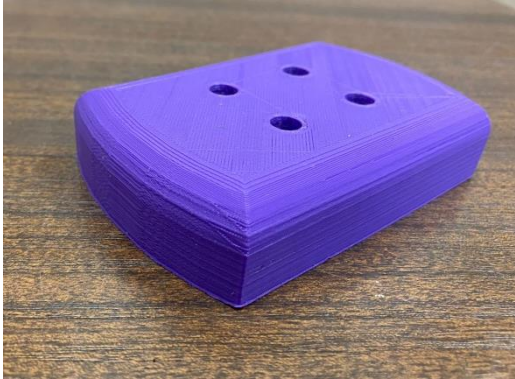
MATRIZ	
ANTES DE LOS ENSAYOS	DESPUÉS DE LOS ENSAYOS
 Ilustración 72. Antes matriz, cara superior; FUENTE: [Propia]	 Ilustración 74. Después matriz, cara superior; FUENTE: [Propia]
 Ilustración 73. Antes matriz, lateral; FUENTE: [Propia]	 Ilustración 75. Después matriz, lateral; FUENTE: [Propia]

Tabla 15. Comparativa antes y después de la matriz.

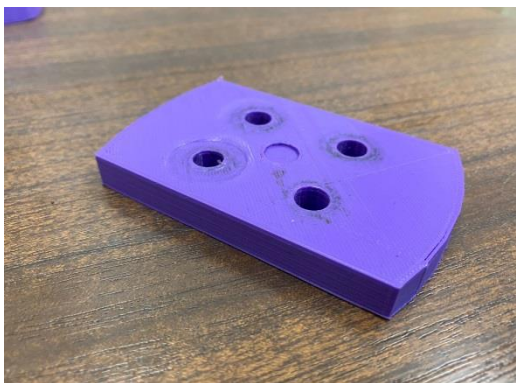
PISADOR	
ANTES DE LOS ENSAYOS	DESPUÉS DE LOS ENSAYOS
 Ilustración 76. Antes pisador, cara superior; FUENTE: [Propia]	 Ilustración 78. Después pisador, cara superior; FUENTE: [Propia]
 Ilustración 77. Antes pisador, lateral; FUENTE: [Propia]	 Ilustración 79. Después pisador, lateral; FUENTE: [Propia]

Tabla 16. Comparativa antes y después del pisador.

Tal y como podemos ver, mediante inspección visual no se aprecia ningún tipo de desgaste en la matriz, ni grietas, ni roturas, ni ningún signo de haber sufrido daños. Sin embargo, en cuanto al pisador, sí que se pueden observar algunos daños superficiales ya que contiene marcas producidas por introducir y apretar las arandelas y los tornillos. Cabe destacar que las marcas superficiales no se han producido debido al ensayo, si no, al factor humano, por lo que, se podría haber incrementado el porcentaje de relleno en la impresión.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

➤ CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se han obtenido serían las siguientes:

- El método SPIF con la adecuada configuración y el uso correcto de las herramientas, permite deformar de manera sencilla láminas de PVC.
- La fabricación aditiva puede ser adecuada para fabricar matrices y utillaje para el proceso SPIF. Se ha observado que la resistencia de la pieza fabricada por FA es suficiente como para no sufrir daños en los ensayos que se han llevado a cabo.
- Usar fabricación aditiva proporciona flexibilidad en los diseños ya que se puede fabricar cualquier geometría de matrices a bajo coste y en poco tiempo.
- El Diseño de Experimentos es una herramienta que permite organizar y planificar ensayos experimentales de forma satisfactoria y facilitar el análisis de resultados.
- En el doblado de chapa por el método SPIF, el factor más influyente en las fuerzas es el ángulo de doblado y en menor medida, el incremento de zeta. Esto es lógico ya que son los factores que más afectan al volumen de material deformado.
- El PVC tiene mucha recuperación elástica, lo que influye en la geometría final. El factor que más afecta es el radio de curvatura.
- Esta recuperación elástica pone en duda la utilidad del método SPIF para doblado de chapa de PVC con tolerancias geométricas exigentes.

➤ TRABAJOS FUTUROS

En cuanto a trabajos futuros se podrían considerar:

- Probar otros factores que podrían influir, como la temperatura durante el proceso, ya que puede ayudar a mejorar la formabilidad y a disminuir la recuperación elástica. Permitiendo el giro del punzón se produciría un incremento de rozamiento, lo que provocaría el aumento de temperatura, y

con lo que podríamos conseguir un doblado con mayor facilidad y una menor de recuperación elástica.

- Probar otros materiales y observar cómo se comportan.
- Probar otras configuraciones de los parámetros de proceso para intentar reducir la recuperación elástica.
- Probar a hacer deformaciones con mayor profundidad, ya que se observa que posiblemente con una deformación más profunda se produzca menos recuperación elástica, y el material podría obtener mejor acabado.

9 REFERENCIAS

- [1] Aguilera Sánchez, J.A. (2018) *Adaptación de un sistema de conformado incremental monopunto para láminas de aluminio*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [2] Mayas Morales, J. (2019) *Influencia de la geometría de los punzones en el conformado por SPIF*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [3] Cazalla Moral, R. (2017) *Simulación de un sistema de conformado incremental monopunto*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [4] Medina Sánchez, G. (2021) *Apuntes “Tecnologías aplicadas a la fabricación”*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [5] Página web de RS. Características del PVC.
<https://es.rs-online.com/web/p/laminas-de-plastico/0680741>
- [6] Página web de smartmaterials3d. Características del PLA.
https://www.smartmaterials3d.com/pla-filamento#/2-tamano-m_750g/26-diametro-175_mm/91-color-wisteria
- [7] Página web de Aslak. Características de la sierra de cinta.
<https://www.aslak.es/madera/5156303-sierra-cinta-p-madera-hbs-633-s-400v-hbs-633-s.html>
- [8] Página web de RS. Características de la impresora BQ WitBox.
<https://es.rs-online.com/web/p/impresoras-3d/8428627>
- [9] Página web de kistler. Características de la mesa dinamométrica.
<https://www.kistler.com/es/producto/type-9257b/>
- [10] Kalpakjian, S. (2013) *Manufacturing Engineering and Technology*. Seventh Edition.
- [11] Medina Sánchez, G. (2021) *Apuntes “Ingeniería del mecanizado”*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.

ANEXO I

En este Anexo, se mostrarán los códigos ISO utilizados para generar las trayectorias de los tres primeros ensayos, los correspondientes a la chapa 1.

Código ISO Ensayo C1.1: Ángulo 90°, Radio 100 mm y ΔZ 0.25 mm

N0060 G00 X-68 Y47.5 Z10
N0070 G00 X-58 Y37.5 Z-10
N0080 G01 X-58 Y37.5 Z-10.25
N0090 G03 Y-37.5 R100
N0100 G01 X-58 Y-37.5 Z-10.5
N0110 G02 Y37.5 R100
N0120 G01 X-58 Y37.5 Z-10.75
N0130 G03 Y-37.5 R100
N0140 G01 X-58 Y-37.5 Z-11
N0150 G02 Y37.5 R100
N0160 G01 X-58 Y37.5 Z-11.25
N0170 G03 Y-37.5 R100
N0180 G01 X-58 Y-37.5 Z-11.5
N0190 G02 Y37.5 R100
N0200 G01 X-58 Y37.5 Z-11.75
N0210 G03 Y-37.5 R100
N0220 G01 X-58 Y-37.5 Z-12
N0230 G02 Y37.5 R100
N0240 G01 X-58 Y37.5 Z-12.25
N0250 G03 Y-37.5 R100
N0260 G01 X-58 Y-37.5 Z-12.5
N0270 G02 Y37.5 R100
N0280 G01 X-58 Y37.5 Z-12.75
N0290 G03 Y-37.5 R100
N0300 G01 X-58 Y-37.5 Z-13
N0310 G02 Y37.5 R100
N0320 G01 X-58 Y37.5 Z-13.25
N0330 G03 Y-37.5 R100
N0340 G01 X-58 Y-37.5 Z-13.5
N0350 G02 Y37.5 R100
N0360 G01 X-58 Y37.5 Z-13.75
N0370 G03 Y-37.5 R100
N0380 G01 X-58 Y-37.5 Z-14
N0390 G02 Y37.5 R100
N0400 G01 X-58 Y37.5 Z-14.25
N0410 G03 Y-37.5 R100
N0420 G01 X-58 Y-37.5 Z-14.5
N0430 G02 Y37.5 R100
N0440 G01 X-58 Y37.5 Z-14.75
N0450 G03 Y-37.5 R100
N0460 G01 X-58 Y-37.5 Z-15
N0470 G02 Y37.5 R100
N0480 G01 X-58 Y37.5 Z-15.25

N0490 G03 Y-37.5 R100
N0500 G01 X-58 Y-37.5 Z-15.5
N0510 G02 Y37.5 R100
N0520 G01 X-58 Y37.5 Z-15.75
N0530 G03 Y-37.5 R100
N0540 G01 X-58 Y-37.5 Z-16
N0550 G02 Y37.5 R100
N0560 G01 X-58 Y37.5 Z-16.25
N0570 G03 Y-37.5 R100
N0580 G01 X-58 Y-37.5 Z-16.5
N0590 G02 Y37.5 R100
N0600 G01 X-58 Y37.5 Z-16.75
N0610 G03 Y-37.5 R100
N0620 G01 X-58 Y-37.5 Z-17
N0630 G02 Y37.5 R100
N0640 G01 X-58 Y37.5 Z-17.25
N0650 G03 Y-37.5 R100
N0660 G01 X-58 Y-37.5 Z-17.5
N0670 G02 Y37.5 R100
N0680 G01 X-58 Y37.5 Z-17.75
N0690 G03 Y-37.5 R100
N0700 G01 X-58 Y-37.5 Z-18
N0710 G02 Y37.5 R100
N0720 G01 X-58 Y37.5 Z-18.25
N0730 G03 Y-37.5 R100
N0740 G01 X-58 Y-37.5 Z-18.5
N0750 G02 Y37.5 R100
N0760 G01 X-58 Y37.5 Z-18.75
N0770 G03 Y-37.5 R100
N0780 G01 X-58 Y-37.5 Z-19
N0790 G02 Y37.5 R100
N0800 G01 X-58 Y37.5 Z-19.25
N0810 G03 Y-37.5 R100
N0820 G01 X-58 Y-37.5 Z-19.5
N0830 G02 Y37.5 R100
N0840 G01 X-58 Y37.5 Z-19.75
N0850 G03 Y-37.5 R100
N0860 G01 X-58 Y-37.5 Z-20
N0870 G02 Y37.5 R100
N0880 G01 X-58 Y37.5 Z-20.25
N0890 G03 Y-37.5 R100
N0900 G01 X-58 Y-37.5 Z-20.5
N0910 G02 Y37.5 R100
N0920 G01 X-58 Y37.5 Z-20.75
N0930 G03 Y-37.5 R100
N0940 G01 X-58 Y-37.5 Z-21
N0950 G02 Y37.5 R100
N0960 G01 X-58 Y37.5 Z-21.25
N0970 G03 Y-37.5 R100
N0980 G01 X-58 Y-37.5 Z-21.5
N0990 G02 Y37.5 R100
N1000 G01 X-58 Y37.5 Z-21.75
N1010 G03 Y-37.5 R100
N1020 G01 X-58 Y-37.5 Z-22
N1030 G02 Y37.5 R100

N1040 G01 X-58 Y37.5 Z-22.25
N1050 G03 Y-37.5 R100
N1060 G01 X-58 Y-37.5 Z-22.5
N1070 G02 Y37.5 R100
N1080 G01 X-58 Y37.5 Z-22.75
N1090 G03 Y-37.5 R100
N1100 G01 X-58 Y-37.5 Z-23
N1110 G02 Y37.5 R100
N1120 G01 X-58 Y37.5 Z-23.25
N1130 G03 Y-37.5 R100
N1140 G01 X-58 Y-37.5 Z-23.5
N1150 G02 Y37.5 R100
N1160 G01 X-58 Y37.5 Z-23.75
N1170 G03 Y-37.5 R100
N1180 G01 X-58 Y-37.5 Z-24
N1190 G02 Y37.5 R100
N1200 G01 X-58 Y37.5 Z-24.25
N1210 G03 Y-37.5 R100
N1220 G01 X-58 Y-37.5 Z-24.5
N1230 G02 Y37.5 R100
N1240 G01 X-58 Y37.5 Z-24.75
N1250 G03 Y-37.5 R100
N1260 G01 X-58 Y-37.5 Z-25
N1270 G02 Y37.5 R100
N1280 G01 X-58 Y37.5 Z-25.25
N1290 G03 Y-37.5 R100
N1300 G01 X-58 Y-37.5 Z-25.5
N1310 G02 Y37.5 R100
N1320 G01 X-58 Y37.5 Z-25.75
N1330 G03 Y-37.5 R100
N1340 G01 X-58 Y-37.5 Z-26
N1350 G02 Y37.5 R100
N1360 G01 X-58 Y37.5 Z-26.25
N1370 G03 Y-37.5 R100
N1380 G01 X-58 Y-37.5 Z-26.5
N1390 G02 Y37.5 R100
N1400 G01 X-58 Y37.5 Z-26.75
N1410 G03 Y-37.5 R100
N1420 G01 X-58 Y-37.5 Z-27
N1430 G02 Y37.5 R100
N1440 G01 X-58 Y37.5 Z-27.25
N1450 G03 Y-37.5 R100
N1460 G01 X-58 Y-37.5 Z-27.5
N1470 G02 Y37.5 R100
N1480 G01 X-58 Y37.5 Z-27.75
N1490 G03 Y-37.5 R100
N1500 G01 X-58 Y-37.5 Z-28
N1510 G02 Y37.5 R100
N1520 G01 X-58 Y37.5 Z-28.25
N1530 G03 Y-37.5 R100
N1540 G01 X-58 Y-37.5 Z-28.5
N1550 G02 Y37.5 R100
N1560 G01 X-58 Y37.5 Z-28.75
N1570 G03 Y-37.5 R100
N1580 G01 X-58 Y-37.5 Z-29

N1590 G02 Y37.5 R100
N1600 G01 X-58 Y37.5 Z-29.25
N1610 G03 Y-37.5 R100
N1620 G01 X-58 Y-37.5 Z-29.5
N1630 G02 Y37.5 R100
N1640 G01 X-58 Y37.5 Z-29.75
N1650 G03 Y-37.5 R100
N1660 G01 X-58 Y-37.5 Z-30
N1670 G02 Y37.5 R100
N1680 G01 X-58 Y37.5 Z-30.25
N1690 G03 Y-37.5 R100
N1700 G01 X-58 Y-37.5 Z-30.5
N1710 G02 Y37.5 R100
N1720 G01 X-58 Y37.5 Z-30.75
N1730 G03 Y-37.5 R100
N1740 G01 X-58 Y-37.5 Z-31
N1750 G02 Y37.5 R100
N1760 G01 X-58 Y37.5 Z-31.25
N1770 G03 Y-37.5 R100
N1780 G01 X-58 Y-37.5 Z-31.5
N1790 G02 Y37.5 R100
N1800 G01 X-58 Y37.5 Z-31.75
N1810 G03 Y-37.5 R100
N1820 G01 X-58 Y-37.5 Z-32
N1830 G02 Y37.5 R100
N1840 G01 X-58 Y37.5 Z-32.25
N1850 G03 Y-37.5 R100
N1860 G01 X-58 Y-37.5 Z-32.5
N1870 G02 Y37.5 R100
N1880 G01 X-58 Y37.5 Z-32.75
N1890 G03 Y-37.5 R100
N1900 G01 X-58 Y-37.5 Z-33
N1910 G02 Y37.5 R100
N1920 G01 X-58 Y37.5 Z-33.25
N1930 G03 Y-37.5 R100
N1940 G01 X-58 Y-37.5 Z-33.5
N1950 G02 Y37.5 R100
N1960 G01 X-58 Y37.5 Z-33.75
N1970 G03 Y-37.5 R100
N1980 G01 X-58 Y-37.5 Z-34
N1990 G02 Y37.5 R100
N2000 G01 X-58 Y37.5 Z-34.25
N2010 G03 Y-37.5 R100
N2020 G01 X-58 Y-37.5 Z-34.5
N2030 G02 Y37.5 R100
N2040 G01 X-58 Y37.5 Z-34.75
N2050 G03 Y-37.5 R100
N2060 G01 X-58 Y-37.5 Z-35
N2070 G02 Y37.5 R100
N2080 G01 Z20
N2090 G00 X0 Y0
N2100 M30

Código ISO Ensayo C1.2: Ángulo 90°, Radio 70 mm y ΔZ 0.25 mm

N0060 G00 X68 Y47.5 Z10
N0070 G00 X58 Y37.5 Z-10
N0080 G01 X58 Y37.5 Z-10.25
N0090 G02 Y-37.5 R70
N0100 G01 X58 Y-37.5 Z-10.5
N0110 G03 Y37.5 R70
N0120 G01 X58 Y37.5 Z-10.75
N0130 G02 Y-37.5 R70
N0140 G01 X58 Y-37.5 Z-11
N0150 G03 Y37.5 R70
N0160 G01 X58 Y37.5 Z-11.25
N0170 G02 Y-37.5 R70
N0180 G01 X58 Y-37.5 Z-11.5
N0190 G03 Y37.5 R70
N0200 G01 X58 Y37.5 Z-11.75
N0210 G02 Y-37.5 R70
N0220 G01 X58 Y-37.5 Z-12
N0230 G03 Y37.5 R70
N0240 G01 X58 Y37.5 Z-12.25
N0250 G02 Y-37.5 R70
N0260 G01 X58 Y-37.5 Z-12.5
N0270 G03 Y37.5 R70
N0280 G01 X58 Y37.5 Z-12.75
N0290 G02 Y-37.5 R70
N0300 G01 X58 Y-37.5 Z-13
N0310 G03 Y37.5 R70
N0320 G01 X58 Y37.5 Z-13.25
N0330 G02 Y-37.5 R70
N0340 G01 X58 Y-37.5 Z-13.5
N0350 G03 Y37.5 R70
N0360 G01 X58 Y37.5 Z-13.75
N0370 G02 Y-37.5 R70
N0380 G01 X58 Y-37.5 Z-14
N0390 G03 Y37.5 R70
N0400 G01 X58 Y37.5 Z-14.25
N0410 G02 Y-37.5 R70
N0420 G01 X58 Y-37.5 Z-14.5
N0430 G03 Y37.5 R70
N0440 G01 X58 Y37.5 Z-14.75
N0450 G02 Y-37.5 R70
N0460 G01 X58 Y-37.5 Z-15
N0470 G03 Y37.5 R70
N0480 G01 X58 Y37.5 Z-15.25
N0490 G02 Y-37.5 R70
N0500 G01 X58 Y-37.5 Z-15.5
N0510 G03 Y37.5 R70
N0520 G01 X58 Y37.5 Z-15.75
N0530 G02 Y-37.5 R70
N0540 G01 X58 Y-37.5 Z-16
N0550 G03 Y37.5 R70
N0560 G01 X58 Y37.5 Z-16.25
N0570 G02 Y-37.5 R70
N0580 G01 X58 Y-37.5 Z-16.5

N0590 G03 Y37.5 R70
N0600 G01 X58 Y37.5 Z-16.75
N0610 G02 Y-37.5 R70
N0620 G01 X58 Y-37.5 Z-17
N0630 G03 Y37.5 R70
N0640 G01 X58 Y37.5 Z-17.25
N0650 G02 Y-37.5 R70
N0660 G01 X58 Y-37.5 Z-17.5
N0670 G03 Y37.5 R70
N0680 G01 X58 Y37.5 Z-17.75
N0690 G02 Y-37.5 R70
N0700 G01 X58 Y-37.5 Z-18
N0710 G03 Y37.5 R70
N0720 G01 X58 Y37.5 Z-18.25
N0730 G02 Y-37.5 R70
N0740 G01 X58 Y-37.5 Z-18.5
N0750 G03 Y37.5 R70
N0760 G01 X58 Y37.5 Z-18.75
N0770 G02 Y-37.5 R70
N0780 G01 X58 Y-37.5 Z-19
N0790 G03 Y37.5 R70
N0800 G01 X58 Y37.5 Z-19.25
N0810 G02 Y-37.5 R70
N0820 G01 X58 Y-37.5 Z-19.5
N0830 G03 Y37.5 R70
N0840 G01 X58 Y37.5 Z-19.75
N0850 G02 Y-37.5 R70
N0860 G01 X58 Y-37.5 Z-20
N0870 G03 Y37.5 R70
N0880 G01 X58 Y37.5 Z-20.25
N0890 G02 Y-37.5 R70
N0900 G01 X58 Y-37.5 Z-20.5
N0910 G03 Y37.5 R70
N0920 G01 X58 Y37.5 Z-20.75
N0930 G02 Y-37.5 R70
N0940 G01 X58 Y-37.5 Z-21
N0950 G03 Y37.5 R70
N0960 G01 X58 Y37.5 Z-21.25
N0970 G02 Y-37.5 R70
N0980 G01 X58 Y-37.5 Z-21.5
N0990 G03 Y37.5 R70
N1000 G01 X58 Y37.5 Z-21.75
N1010 G02 Y-37.5 R70
N1020 G01 X58 Y-37.5 Z-22
N1030 G03 Y37.5 R70
N1040 G01 X58 Y37.5 Z-22.25
N1050 G02 Y-37.5 R70
N1060 G01 X58 Y-37.5 Z-22.5
N1070 G03 Y37.5 R70
N1080 G01 X58 Y37.5 Z-22.75
N1090 G02 Y-37.5 R70
N1100 G01 X58 Y-37.5 Z-23
N1110 G03 Y37.5 R70
N1120 G01 X58 Y37.5 Z-23.25
N1130 G02 Y-37.5 R70

N1140 G01 X58 Y-37.5 Z-23.5
N1150 G03 Y37.5 R70
N1160 G01 X58 Y37.5 Z-23.75
N1170 G02 Y-37.5 R70
N1180 G01 X58 Y-37.5 Z-24
N1190 G03 Y37.5 R70
N1200 G01 X58 Y37.5 Z-24.25
N1210 G02 Y-37.5 R70
N1220 G01 X58 Y-37.5 Z-24.5
N1230 G03 Y37.5 R70
N1240 G01 X58 Y37.5 Z-24.75
N1250 G02 Y-37.5 R70
N1260 G01 X58 Y-37.5 Z-25
N1270 G03 Y37.5 R70
N1280 G01 X58 Y37.5 Z-25.25
N1290 G02 Y-37.5 R70
N1300 G01 X58 Y-37.5 Z-25.5
N1310 G03 Y37.5 R70
N1320 G01 X58 Y37.5 Z-25.75
N1330 G02 Y-37.5 R70
N1340 G01 X58 Y-37.5 Z-26
N1350 G03 Y37.5 R70
N1360 G01 X58 Y37.5 Z-26.25
N1370 G02 Y-37.5 R70
N1380 G01 X58 Y-37.5 Z-26.5
N1390 G03 Y37.5 R70
N1400 G01 X58 Y37.5 Z-26.75
N1410 G02 Y-37.5 R70
N1420 G01 X58 Y-37.5 Z-27
N1430 G03 Y37.5 R70
N1440 G01 X58 Y37.5 Z-27.25
N1450 G02 Y-37.5 R70
N1460 G01 X58 Y-37.5 Z-27.5
N1470 G03 Y37.5 R70
N1480 G01 X58 Y37.5 Z-27.75
N1490 G02 Y-37.5 R70
N1500 G01 X58 Y-37.5 Z-28
N1510 G03 Y37.5 R70
N1520 G01 X58 Y37.5 Z-28.25
N1530 G02 Y-37.5 R70
N1540 G01 X58 Y-37.5 Z-28.5
N1550 G03 Y37.5 R70
N1560 G01 X58 Y37.5 Z-28.75
N1570 G02 Y-37.5 R70
N1580 G01 X58 Y-37.5 Z-29
N1590 G03 Y37.5 R70
N1600 G01 X58 Y37.5 Z-29.25
N1610 G02 Y-37.5 R70
N1620 G01 X58 Y-37.5 Z-29.5
N1630 G03 Y37.5 R70
N1640 G01 X58 Y37.5 Z-29.75
N1650 G02 Y-37.5 R70
N1660 G01 X58 Y-37.5 Z-30
N1670 G03 Y37.5 R70
N1680 G01 X58 Y37.5 Z-30.25

N1690 G02 Y-37.5 R70
N1700 G01 X58 Y-37.5 Z-30.5
N1710 G03 Y37.5 R70
N1720 G01 X58 Y37.5 Z-30.75
N1730 G02 Y-37.5 R70
N1740 G01 X58 Y-37.5 Z-31
N1750 G03 Y37.5 R70
N1760 G01 X58 Y37.5 Z-31.25
N1770 G02 Y-37.5 R70
N1780 G01 X58 Y-37.5 Z-31.5
N1790 G03 Y37.5 R70
N1800 G01 X58 Y37.5 Z-31.75
N1810 G02 Y-37.5 R70
N1820 G01 X58 Y-37.5 Z-32
N1830 G03 Y37.5 R70
N1840 G01 X58 Y37.5 Z-32.25
N1850 G02 Y-37.5 R70
N1860 G01 X58 Y-37.5 Z-32.5
N1870 G03 Y37.5 R70
N1880 G01 X58 Y37.5 Z-32.75
N1890 G02 Y-37.5 R70
N1900 G01 X58 Y-37.5 Z-33
N1910 G03 Y37.5 R70
N1920 G01 X58 Y37.5 Z-33.25
N1930 G02 Y-37.5 R70
N1940 G01 X58 Y-37.5 Z-33.5
N1950 G03 Y37.5 R70
N1960 G01 X58 Y37.5 Z-33.75
N1970 G02 Y-37.5 R70
N1980 G01 X58 Y-37.5 Z-34
N1990 G03 Y37.5 R70
N2000 G01 X58 Y37.5 Z-34.25
N2010 G02 Y-37.5 R70
N2020 G01 X58 Y-37.5 Z-34.5
N2030 G03 Y37.5 R70
N2040 G01 X58 Y37.5 Z-34.75
N2050 G02 Y-37.5 R70
N2060 G01 X58 Y-37.5 Z-35
N2070 G03 Y37.5 R70
N2080 G01 Z20
N2090 G00 X0 Y0
N2100 M30

Código ISO Ensayo C1.3: Ángulo 90°, Radio valor infinito y ΔZ 0.25 mm

N0060 G00 X-68 Y47.5 Z10
N0070 G00 X-58 Y45.5 Z-10
N0080 G01 X-70 Y45.5 Z-10.25
N0090 G01 X70 Y45.5 Z-10.25
N0100 G01 X70 Y45.5 Z-10.5
N0110 G01 X-70 Y45.5 Z-10.5
N0120 G01 X-70 Y45.5 Z-10.75
N0130 G01 X70 Y45.5 Z-10.75
N0140 G01 X70 Y45.5 Z-11
N0150 G01 X-70 Y45.5 Z-11
N0160 G01 X-70 Y45.5 Z-11.25
N0170 G01 X70 Y45.5 Z-11.25
N0180 G01 X70 Y45.5 Z-11.5
N0190 G01 X-70 Y45.5 Z-11.5
N0200 G01 X-70 Y45.5 Z-11.75
N0210 G01 X70 Y45.5 Z-11.75
N0220 G01 X70 Y45.5 Z-12
N0230 G01 X-70 Y45.5 Z-12
N0240 G01 X-70 Y45.5 Z-12.25
N0250 G01 X70 Y45.5 Z-12.25
N0260 G01 X70 Y45.5 Z-12.5
N0270 G01 X-70 Y45.5 Z-12.5
N0280 G01 X-70 Y45.5 Z-12.75
N0290 G01 X70 Y45.5 Z-12.75
N0300 G01 X70 Y45.5 Z-13
N0310 G01 X-70 Y45.5 Z-13
N0320 G01 X-70 Y45.5 Z-13.25
N0330 G01 X70 Y45.5 Z-13.25
N0340 G01 X70 Y45.5 Z-13.5
N0350 G01 X-70 Y45.5 Z-13.5
N0360 G01 X-70 Y45.5 Z-13.75
N0370 G01 X70 Y45.5 Z-13.75
N0380 G01 X70 Y45.5 Z-14
N0390 G01 X-70 Y45.5 Z-14
N0400 G01 X-70 Y45.5 Z-14.25
N0410 G01 X70 Y45.5 Z-14.25
N0420 G01 X70 Y45.5 Z-14.5
N0430 G01 X-70 Y45.5 Z-14.5
N0440 G01 X-70 Y45.5 Z-14.75
N0450 G01 X70 Y45.5 Z-14.75
N0460 G01 X70 Y45.5 Z-15
N0470 G01 X-70 Y45.5 Z-15
N0480 G01 X-70 Y45.5 Z-15.25
N0490 G01 X70 Y45.5 Z-15.25
N0500 G01 X70 Y45.5 Z-15.5
N0510 G01 X-70 Y45.5 Z-15.5
N0520 G01 X-70 Y45.5 Z-15.75
N0530 G01 X70 Y45.5 Z-15.75
N0540 G01 X70 Y45.5 Z-16
N0550 G01 X-70 Y45.5 Z-16
N0560 G01 X-70 Y45.5 Z-16.25
N0570 G01 X70 Y45.5 Z-16.25
N0580 G01 X70 Y45.5 Z-16.5

N0590 G01 X-70 Y45.5 Z-16.5
N0600 G01 X-70 Y45.5 Z-16.75
N0610 G01 X70 Y45.5 Z-16.75
N0620 G01 X70 Y45.5 Z-17
N0630 G01 X-70 Y45.5 Z-17
N0640 G01 X-70 Y45.5 Z-17.25
N0650 G01 X70 Y45.5 Z-17.25
N0660 G01 X70 Y45.5 Z-17.5
N0670 G01 X-70 Y45.5 Z-17.5
N0680 G01 X-70 Y45.5 Z-17.75
N0690 G01 X70 Y45.5 Z-17.75
N0700 G01 X70 Y45.5 Z-18
N0710 G01 X-70 Y45.5 Z-18
N0720 G01 X-70 Y45.5 Z-18.25
N0730 G01 X70 Y45.5 Z-18.25
N0740 G01 X70 Y45.5 Z-18.5
N0750 G01 X-70 Y45.5 Z-18.5
N0760 G01 X-70 Y45.5 Z-18.75
N0770 G01 X70 Y45.5 Z-18.75
N0780 G01 X70 Y45.5 Z-19
N0790 G01 X-70 Y45.5 Z-19
N0800 G01 X-70 Y45.5 Z-19.25
N0810 G01 X70 Y45.5 Z-19.25
N0820 G01 X70 Y45.5 Z-19.5
N0830 G01 X-70 Y45.5 Z-19.5
N0840 G01 X-70 Y45.5 Z-19.75
N0850 G01 X70 Y45.5 Z-19.75
N0860 G01 X70 Y45.5 Z-20
N0870 G01 X-70 Y45.5 Z-20
N0880 G01 X-70 Y45.5 Z-20.25
N0890 G01 X70 Y45.5 Z-20.25
N0900 G01 X70 Y45.5 Z-20.5
N0910 G01 X-70 Y45.5 Z-20.5
N0920 G01 X-70 Y45.5 Z-20.75
N0930 G01 X70 Y45.5 Z-20.75
N0940 G01 X70 Y45.5 Z-21
N0950 G01 X-70 Y45.5 Z-21
N0960 G01 X-70 Y45.5 Z-21.25
N0970 G01 X70 Y45.5 Z-21.25
N0980 G01 X70 Y45.5 Z-21.5
N0990 G01 X-70 Y45.5 Z-21.5
N1000 G01 X-70 Y45.5 Z-21.75
N1010 G01 X70 Y45.5 Z-21.75
N1020 G01 X70 Y45.5 Z-22
N1030 G01 X-70 Y45.5 Z-22
N1040 G01 X-70 Y45.5 Z-22.25
N1050 G01 X70 Y45.5 Z-22.25
N1060 G01 X70 Y45.5 Z-22.5
N1070 G01 X-70 Y45.5 Z-22.5
N1080 G01 X-70 Y45.5 Z-22.75
N1090 G01 X70 Y45.5 Z-22.75
N1100 G01 X70 Y45.5 Z-23
N1110 G01 X-70 Y45.5 Z-23
N1120 G01 X-70 Y45.5 Z-23.25
N1130 G01 X70 Y45.5 Z-23.25

N1140 G01 X70 Y45.5 Z-23.5
N1150 G01 X-70 Y45.5 Z-23.5
N1160 G01 X-70 Y45.5 Z-23.75
N1170 G01 X70 Y45.5 Z-23.75
N1180 G01 X70 Y45.5 Z-24
N1190 G01 X-70 Y45.5 Z-24
N1200 G01 X-70 Y45.5 Z-24.25
N1210 G01 X70 Y45.5 Z-24.25
N1220 G01 X70 Y45.5 Z-24.5
N1230 G01 X-70 Y45.5 Z-24.5
N1240 G01 X-70 Y45.5 Z-24.75
N1250 G01 X70 Y45.5 Z-24.75
N1260 G01 X70 Y45.5 Z-25
N1270 G01 X-70 Y45.5 Z-25
N1280 G01 X-70 Y45.5 Z-25.25
N1290 G01 X70 Y45.5 Z-25.25
N1300 G01 X70 Y45.5 Z-25.5
N1310 G01 X-70 Y45.5 Z-25.5
N1320 G01 X-70 Y45.5 Z-25.75
N1330 G01 X70 Y45.5 Z-25.75
N1340 G01 X70 Y45.5 Z-26
N1350 G01 X-70 Y45.5 Z-26
N1360 G01 X-70 Y45.5 Z-26.25
N1370 G01 X70 Y45.5 Z-26.25
N1380 G01 X70 Y45.5 Z-26.5
N1390 G01 X-70 Y45.5 Z-26.5
N1400 G01 X-70 Y45.5 Z-26.75
N1410 G01 X70 Y45.5 Z-26.75
N1420 G01 X70 Y45.5 Z-27
N1430 G01 X-70 Y45.5 Z-27
N1440 G01 X-70 Y45.5 Z-27.25
N1450 G01 X70 Y45.5 Z-27.25
N1460 G01 X70 Y45.5 Z-27.5
N1470 G01 X-70 Y45.5 Z-27.5
N1480 G01 X-70 Y45.5 Z-27.75
N1490 G01 X70 Y45.5 Z-27.75
N1500 G01 X70 Y45.5 Z-28
N1510 G01 X-70 Y45.5 Z-28
N1520 G01 X-70 Y45.5 Z-28.25
N1530 G01 X70 Y45.5 Z-28.25
N1540 G01 X70 Y45.5 Z-28.5
N1550 G01 X-70 Y45.5 Z-28.5
N1560 G01 X-70 Y45.5 Z-28.75
N1570 G01 X70 Y45.5 Z-28.75
N1580 G01 X70 Y45.5 Z-29
N1590 G01 X-70 Y45.5 Z-29
N1600 G01 X-70 Y45.5 Z-29.25
N1610 G01 X70 Y45.5 Z-29.25
N1620 G01 X70 Y45.5 Z-29.5
N1630 G01 X-70 Y45.5 Z-29.5
N1640 G01 X-70 Y45.5 Z-29.75
N1650 G01 X70 Y45.5 Z-29.75
N1660 G01 X70 Y45.5 Z-30
N1670 G01 X-70 Y45.5 Z-30
N1680 G01 Z20

N1690 G00 X0 Y0
N1700 M30