



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**INFLUENCIA DE LA
GEOMETRÍA DE LOS
PUNZONES EN EL
CONFORMADO POR SPIF**

Alumno: Jaime Mayas Morales

Tutor: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez

Prof. D. Alberto J. García Collado

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera.

Septiembre, 2019



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

Don Gustavo Medina Sánchez y Alberto J. García Collado , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Influencia de la geometría de los punzones en el conformado por SPIF, que presenta Jaime Mayas Morales, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2019

El alumno:

Los tutores:

Gustavo Medina Sánchez

Jaime Mayas Morales

Alberto J. García Collado

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Objetivos.....	9
1.3. Conformado Incremental.....	10
1.3.1. Conformado incremental monopunto.....	10
1.3.2. Conformado por Spinning.....	11
1.3.3. Conformado incremental con herramienta opuesta.....	11
1.3.4. Two Point Incremental Forming.....	12
1.3.5. Conformado incremental multietapa.....	13
1.3.6. Ventajas del SPIF.....	14
1.3.7. Aplicaciones del SPIF.....	15
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2.1. Realización de los punzones.....	16
2.1.1. Material.....	16
2.1.2. Geometría.....	17
2.2. Placa para SPIF.....	24
2.2.1. Material.....	24
2.2.2. Geometría.....	24
2.3. Parámetros tecnológicos.....	26
2.4. Material necesario.....	28
2.4.1. Fresadora CNC.....	28
2.4.2. Punzones.....	30
2.4.3. Sistema de sujeción.....	30
2.4.4. Mesa dinamométrica.....	32
2.4.5. Rugosímetro.....	35
2.4.6. Torno CNC.....	38
2.4.7. Software complementario.....	39
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	40
3.1. Diseño de ensayos.....	40
3.2. Generación del código ISO.....	41
3.2.1. Generación código ISO para punzones.....	41
3.2.2. Generación código ISO para SPIF.....	53
3.3. Simulación del código ISO.....	56

3.4.	Fabricación de los punzones.....	58
3.5.	Realización de los ensayos.....	60
3.5.1.	Preparación de las placas.....	60
3.5.2.	Preparación de la fresadora.....	60
3.5.3.	Ejecución del ensayo.....	61
3.5.4.	Medidas de fuerzas.....	65
3.5.5.	Medidas de rugosidad.....	66
3.5.6.	Incidencias durante los ensayos.....	67
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVAS.....	72
4.1.	Resultados de las fuerzas para geometría con ángulo fijo.....	72
4.2.	Resultados de las fuerzas para geometría con ángulo variable.....	77
4.3.	Resultados de rugosidad para geometría con ángulo fijo.....	81
4.4.	Resultados de rugosidad para geometría con ángulo variable.....	82
5.	CONCLUSIONES.....	83
6.	TRABAJOS FUTUROS.....	84
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Medida de los punzones cónicos.....	18
Tabla 2	Medida de los punzones esféricos.....	20
Tabla 3	Medida de los punzones ovoide.....	22
Tabla 4	Planificación de los ensayos.....	41
Tabla 5	Valores de fuerzas en geometría cónica.....	76
Tabla 6	Valores de fuerzas en Frustrum.....	80
Tabla 7	Medidas de rugosidad geometría cónica.....	81
Tabla 8	Medidas de rugosidad geometría frustrum.....	82

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1.1 Conformado por SPIF.....	10
Ilustración 1.2 Conformado por Spinning.....	11
Ilustración 1.3 Conformado con herramienta opuesta	12
Ilustración 1.4 Tipos de conformado incremental.....	13
Ilustración 1.5 Conformado incremental multietapa	13
Ilustración 1.6 Aplicaciones del conformado incremental.....	15
Ilustración 1.7 Prótesis craneal mediante SPIF	16
Ilustración 2.1 Fresa cónica.....	18
Ilustración 2.2 Punta cónica de radio 2.....	18
Ilustración 2.3 Punta cónica 2.....	19
Ilustración 2.4 Punta cónica 1.....	19
Ilustración 2.5 Punta cónica 3.....	19
Ilustración 2.6 Fresa esférica.....	20
Ilustración 2.7 Punta esférica de radio 10 mm	20
Ilustración 2.8 Punta esférica 1	21
Ilustración 2.9 Punta esférica 2	21
Ilustración 2.10 Punta esférica 3	21
Ilustración 2.11 Fresa ovoide.....	22
Ilustración 2.12 Punta ovoide de radio 2 mm.....	22
Ilustración 2.13 Punta ovoide 1	23
Ilustración 2.14 Punta ovoide 2	23
Ilustración 2.15 Geometría a obtener de ambos ensayos.....	25
Ilustración 2.16 Geometría 1	25
Ilustración 2.17 Geometría 2	26
Ilustración 2.18 Ficha técnica fresadora CNC.....	29
Ilustración 2.19 Soporte fijación de placa PVC	31
Ilustración 2.20 Montaje real del soporte de fijación	32
Ilustración 2.21 Sistema de medición de fuerzas.....	33
Ilustración 2.22 Ficha técnica de la mesa dinamométrica.....	34
Ilustración 2.23 Montaje completo para la realización del SPIF	34
Ilustración 2.24 Esquema de medición de rugosidad.....	36
Ilustración 2.25 Rugosímetro MITUTOYO	36
Ilustración 2.26 Ficha Técnica rugosímetro	37
Ilustración 2.27 Torno eclipse CNC	38
Ilustración 2.28 Ficha técnica eclipse CNC.....	39
Ilustración 3.1 Geometría de la herramienta cónica.....	42
Ilustración 3.2 Coordenadas de la herramienta cónica	43
Ilustración 3.3 Coordenadas de la herramienta cónica 2	44
Ilustración 3.4 Generación punta cónica 1.....	45
Ilustración 3.5 Generación punta cónica 2.....	45

Ilustración 3.6 Generación punta cónica 3.....	46
Ilustración 3.7 Geometría de la punta ovoide	47
Ilustración 3.8 Coordenadas finales de la geometría ovoide.....	48
Ilustración 3.9 Generación punta ovoide 1.....	49
Ilustración 3.10 Generación punta ovoide 2.....	50
Ilustración 3.11 Generación punta esférica 1.....	51
Ilustración 3.12 Generación punta esférica 2.....	51
Ilustración 3.13 Generación punta esférica 3.....	52
Ilustración 3.14 Geometría del tronco de cono recto.	53
Ilustración 3.15 Hoja Excel del cono recto.....	54
Ilustración 3.16 Geometría Frustrum	55
Ilustración 3.17 Ángulo variable del Frustrum.....	55
Ilustración 3.18 Hoja Excel Frustrum	56
Ilustración 3.19 Simulación de la trayectoria recta.....	57
Ilustración 3.20 Simulación de la trayectoria Frustrum	57
Ilustración 3.21 Fabricación de las puntas en torno CNC	58
Ilustración 3.22 Diferentes puntas fabricadas para los ensayos	59
Ilustración 3.23 Metodología para la realización de los ensayos	62
Ilustración 3.24 Realización de un frustrum con la punta esférica	63
Ilustración 3.25 Realización de un cono con la punta cónica.....	63
Ilustración 3.26 Geometría de un cono recto obtenida con la punta esférica 12.....	64
Ilustración 3.27 Geometría de un frustrum obtenida con la punta esférica 12.....	64
Ilustración 3.28 Gráfica de medida de fuerza en eje Z.....	66
Ilustración 3.29 Resultado ensayo con punta cónica radio 1 mm	68
Ilustración 3.30 Resultado ensayo punta ovoide radio 2 mm.....	68
Ilustración 3.31 Realización del ensayo con punta cónica	69
Ilustración 3.32 Resultado ensayo punta cónica radio 2 mm	70
Ilustración 3.33 Punta nueva fabricada.....	71
Ilustración 3.34 Restauración de la punta esférica de 8 mm.....	71
Ilustración 4.1 Fuerzas punta ovoide	73
Ilustración 4.2 Fuerzas punta cónica	73
Ilustración 4.3 Fuerzas punta esférica 2	74
Ilustración 4.4 Fuerzas punta esférica 1	74
Ilustración 4.5 Fuerzas punta esférica 3	75
Ilustración 4.6 Fuerzas punta ovoide	77
Ilustración 4.7 Fuerzas punta cónica	78
Ilustración 4.8 Fuerzas esférica 2.....	78
Ilustración 4.9 Fuerzas esférica 1	79
Ilustración 4.10 Fuerzas esférica 3.....	79
Ilustración 4.11 Esquema de medida de rugosidad	82

1. INTRODUCCIÓN.

Los procesos de mecanizado son utilizados a diario por todas las industrias para la fabricación de todo tipo de productos, ya sean de grandes dimensiones, pequeñas dimensiones, en cadena, producción puntual, etc. Dentro de esta categoría encontramos el mecanizado por arranque de material, que es el proceso más usado a día de hoy por su gran versatilidad, dentro de los procesos de mecanizado encontramos el conformado, usado tanto en operaciones de formado u operaciones de deformación volumétrica. Este tipo de procesos convencionales requieren la fabricación de grandes lotes de productos, así como una alta inversión en maquinaria y personal.

Además, otro proceso muy utilizado en la actualidad por su gran facilidad de operación y su alta rentabilidad económicamente en lotes grandes es el Conformado de chapa no siendo rentable para pequeños lotes o prototipos.

Debido a los problemas que surgen con la fabricación convencional surge la necesidad de estudiar nuevos procesos mucho más eficientes y que requieran menos inversión inicial, así como la reutilización de maquinaria ya existente como son los centros de mecanizado, bien de 5 u 11 ejes. Una de estas alternativas es el Conformado Incremental o ISF (Incremental Sheet Forming), en concreto el Conformado Incremental Mono punto es el más usado o más conocido como SPIF (Single Point Incremental Forming), este método utiliza una máquina CNC a la cual se le añade un punzón que generalmente es esférico, debido a un código ISO previamente implementado esta máquina realizará una serie de movimientos que implican el contacto del punzón con la pieza de la cual se parte y que realizando una serie de movimientos incrementales se obtendrá una pieza final como resultado de la deformación de este material, este proceso presenta muchas ventajas con respecto a los convencionales ya que ofrece una alternativa eficiente, sin desecho de material y además la fabricación de prototipado rápido la cual es una técnica muy demandada en la actualidad.

Debido a todas estas ventajas que tiene este tipo de proceso, cabe la necesidad de abordar un estudio del método de conformado por SPIF en el cual se estudien los diferentes parámetros que intervienen tanto como en el pre-proceso como en el postproceso como, por ejemplo, fuerzas que intervienen en el proceso, temperaturas, calidad superficial de la pieza final, etc.

En el presente trabajo se estudiara un proceso se conformado de chapa de aluminio por SPIF en el cual analizaremos la calidad superficial obtenida, las fuerzas que intervienen en el proceso pero sobre todo y lo más importante de este estudio es la influencia de la geometría que tiene el punzón en los parámetros finales mencionados anteriormente, por lo que para llevar a cabo este trabajo previamente hay que fabricar diferentes tipos de punzones en aluminio con los cuales se realizaran varios ensayos.

1.1. Antecedentes

El proceso de conformado por SPIF es un proceso innovador y que, en un futuro, puede tener bastante importancia en los procesos de conformado de material, tanto en la industria (grandes producciones) como en pequeñas series como puede ser el prototipado rápido.

Debido a la gran importancia que supone este proceso innovador, el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Jaén tiene a su cargo varios estudios sobre las técnicas del conformado de chapa mediante SPIF para lo cual fue necesario adaptar una maquina CNC convencional a una máquina de conformado por SPIF.

Sobre este proceso, se han encontrado algunos trabajos anteriores que estudian varios parámetros que influyen en la calidad del SPIF y que son necesarios analizar para poder mejorar este proceso entre estos destacan:

- Estudio sobre la simulación de un sistema de conformado incremental mono punto, realizado por Cazalla Moral R. (2017) [1] en el cual se estudia la veracidad de los ensayos experimentales previamente realizados con las correspondientes simulaciones con el método numérico, para así poder en un futuro anteponer resultados de manera digital.
- Análisis mediante Software Abaqus de la influencia de diferentes parámetros mediante SPIF de Jódar Carrasco F.M. (2018) [2] en septiembre de 2018 donde se estudia la influencia de la geometría del punzón en conformado por SPIF mediante simulaciones numéricas analizando parámetros significantes del proceso.

1.2. Objetivos

En este trabajo, se estudiará la influencia que tiene la geometría del punzón, tanto la punta del punzón como el grosor del mismo, en diferentes parámetros de este proceso como son fuerzas que intervienen en él y calidad superficial de la placa ensayada, para llevar a cabo esto se plantean los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio bibliográfico del proceso SPIF
- Diseñar y fabricar punzones de aluminio con diferentes geometrías y formas semiesféricas, paraboloides y cónicas.
- Realizar ensayos en placas de PVC con diferentes geometrías distintas a seguir por el control CNC anteriormente programas y con los distintos punzones que se han realizado previamente, en estos ensayos mediremos diferentes parámetros característicos como son las fuerzas que intervienen en el proceso, la calidad superficial del acabado final y la geometría de la placa obtenida en el ensayo.
- Sacar conclusiones sobre la influencia de la geometría del punzón con respecto a los distintos factores mencionados anteriormente.

1.3. Conformado Incremental

1.3.1. Conformado incremental monopunto

Dentro del sector de la industria encontramos procesos para deformación de chapa bastante convencionales como por ejemplo la embutición, el laminado, etc. los cuales son rentables para fabricar grandes series a un bajo coste y un alto rendimiento, pero para fabricar series reducidas de piezas deja de ser un proceso viable, de ahí nace la idea del conformado incremental monopunto o SPIF, ya que este es idóneo para el prototipado rápido.

El conformado incremental monopunto se caracteriza por usar una única herramienta y generar una trayectoria a partir de un centro de mecanizado. Esta herramienta se desplazará siguiendo trayectorias en 2D con diferentes profundidades que irán deformando progresivamente la chapa.

Debido a estas características, este sistema permite el conformado de chapas con una geometría muy particular, en pequeños lotes de piezas y a un coste relativamente bajo, siendo su uso principalmente en la industria aeronáutica y automovilística.

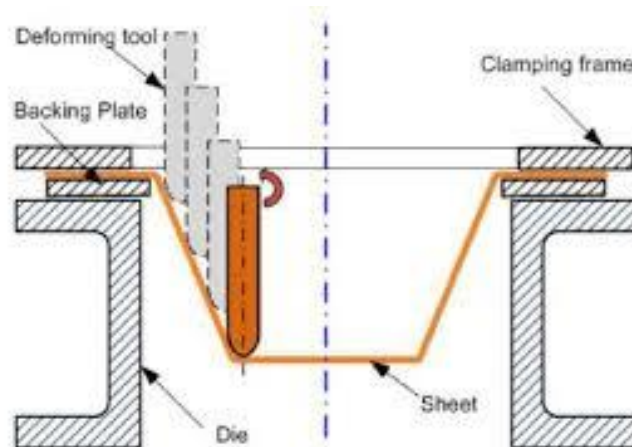


Ilustración 1.1 Conformado por SPIF

A parte del conformado por SPIF existen otras variantes de este proceso más antiguas y que son las bases del estudio del conformado por SPIF, algunas de estas se describen a continuación.

1.3.2. Conformado por Spinning

En este proceso se utiliza una maquina muy similar a un torno donde se coloca un molde en negativo o positivo llamado mandril. Se hace girar una chapa anexa al extremo del mandril, la herramienta es accionada mecánicamente o manualmente y va aproximando la forma de la chapa a la forma del mandril, la herramienta usada tiene forma de rodillo.

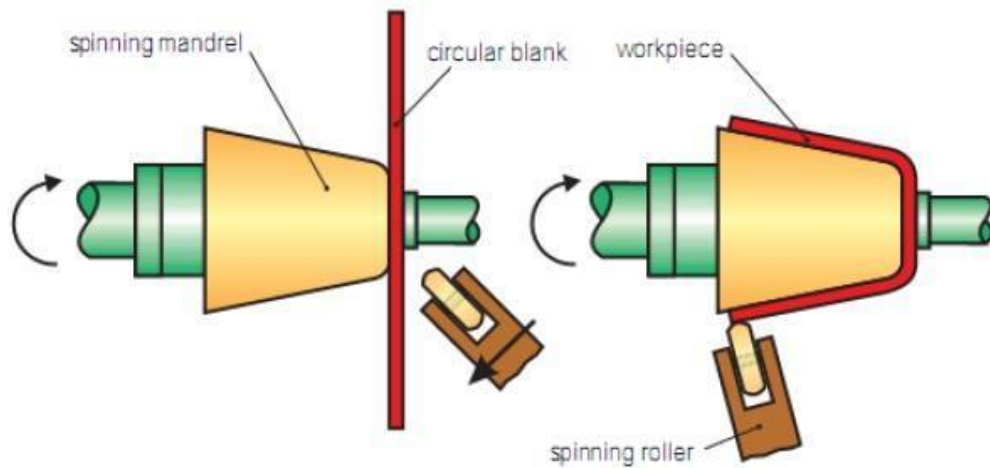


Ilustración 1.2 Conformado por Spinning

1.3.3. Conformado incremental con herramienta opuesta.

Este tipo de proceso (*Incremental Forming With Counter Tool, IFWCT*), es una variante del SPIF, en la cual no es necesaria la matriz inferior, esto es debido a que existe una herramienta en el mismo punto, pero en el lado opuesto que recorrerá la misma trayectoria que el punzón principal.

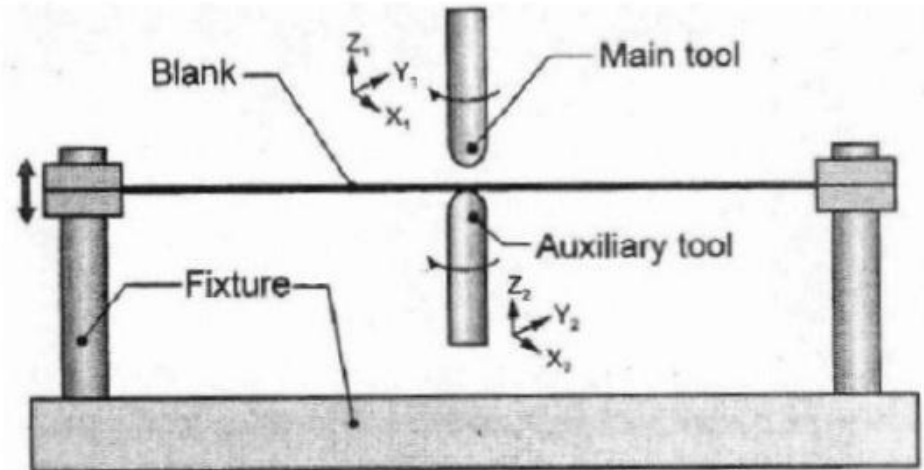


Ilustración 1.3 Conformado con herramienta opuesta

1.3.4. Two Point Incremental Forming

Es un proceso muy similar al SPIF pero en contraposición, en esta variante se usa una matriz como punto de apoyo de la trayectoria, en diferencia con el anterior proceso en este, la matriz no sigue la trayectoria de la herramienta principal si no que esta sirve para una mejor precisión y acabado de la chapa final.

Existen dos tipos de matrices en este proceso, la matriz parcial o matriz completa. La primera de ellas simplemente sirve de guía para la trayectoria que va a seguir mientras que la segunda facilita el acabado de la chapa y actúa de manera similar al mandril en conformado por *Spinning*.

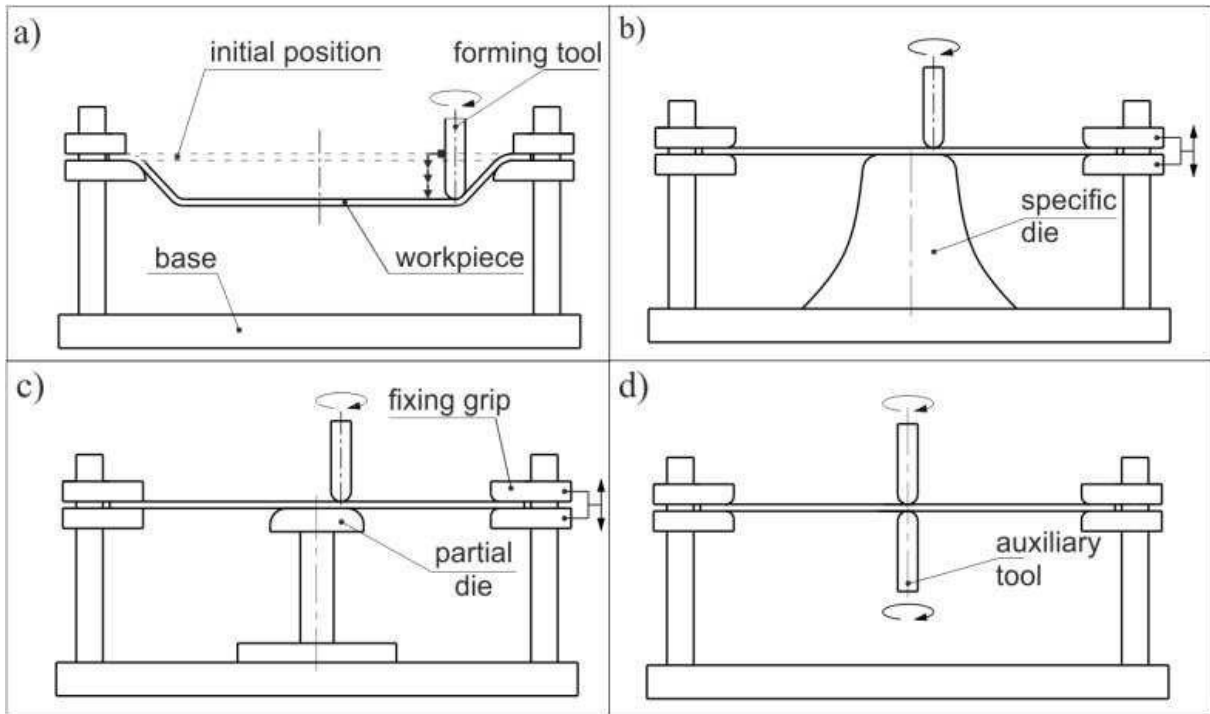


Ilustración 1.4 Tipos de conformado incremental

1.3.5. Conformado incremental multietapa.

Este tipo de proceso es muy similar al proceso de conformado mono punto, la única diferencia es que en este podemos variar el ángulo del cono que producimos, obteniendo así, una forma determinada diferente a la trayectoria de cono recto, la trayectoria más común de ángulo variable es el *frustum*.

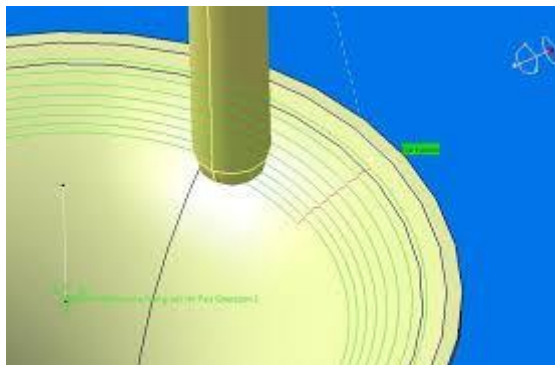


Ilustración 1.5 Conformado incremental multietapa

1.3.6. Ventajas del SPIF.

Ya sabemos que en la industria existen diversas técnicas de conformado de chapa para grandes y pequeñas producciones, pero, como hemos visto anteriormente, dentro del más innovador como es el conformado incremental vamos a destacar el conformado incremental mono punto o SPIF de entre todos los procesos ya que posee una serie de ventajas:

- Proceso altamente automatizado, ya que se producen diferentes piezas sin necesidad de hacer pocas acciones manualmente, se pueden importar directamente de un archivo CAD.
- No se requieren matrices o mandriles ya que la geometría de la trayectoria determina la forma final de la pieza.
- Gran facilidad para corregir errores de diseño posteriormente ya que esta todo computarizado.
- Se pueden realizar en una maquina convencional CNC ya que simplemente cambiando la herramienta por un determinado punzón podremos realizar la operación.
- Se requieren pocas fuerzas en el proceso, ya que todo el proceso se realiza de forma incremental.
- Se consiguen unos acabados superficiales bastante buenos.
- Se pueden realizar diferentes piezas de varios tamaños limitada solamente por el tipo de maquinaria.

Por otro lado, también este proceso como todos los existentes tiene sus inconvenientes:

- Esta limitado solo a pequeñas series de piezas, ya que es un proceso bastante lento comparado con los convencionales.
- No se pueden fabricar piezas con ángulos rectos ya que geoméricamente es imposible.
- El acabado superficial depende de muchas variables.

- Intervienen factores más importantes como es el calor desprendido por rozamiento por la fricción que se genera y si no se realiza bien el proceso solo podemos fabricar chapas de aluminio u otros metales.

1.3.7. Aplicaciones del SPIF.

El conformado incremental tiene diversas aplicaciones que ya se utilizan para la fabricación, pero además tiene otras que se están estudiando para su uso en un futuro, principalmente se usa para prototipado rápido y pequeñas series de piezas debido a su bajo coste y versatilidad.

La gran aplicación de este proceso se extiende a la industria automovilística y aeronáutica debido a las grandes piezas de chapa que componen estos productos, podemos encontrar la fabricación de pequeñas piezas como son reflectores de faros, colectores de motores para mejorar vibraciones y transmisión de calor, silenciadores de escape y diversas pequeñas piezas de las que se compone el automóvil como por ejemplo tanques de gasolina.

Un campo muy interesante que se está estudiando es el uso de esta técnica para la fabricación de distintas prótesis medicinales en diversos materiales, ya que se trata de pequeñas piezas con una precisión muy buena y acabados superficiales buenos.



Ilustración 1.6 Aplicaciones del conformado incremental

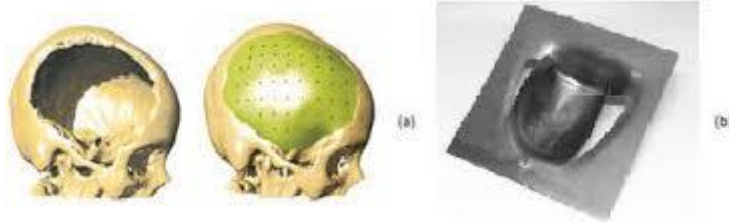


Ilustración 1.7 Prótesis craneal mediante SPIF

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

En este apartado explicaremos toda la descripción del problema que vamos a estudiar, además de los parámetros que influyen y todo lo relacionado con el problema como es: maquinaria usada, materiales a mecanizar y a deformar, geometría del mecanizado y del SPIF, etc.

Vamos a realizar una división del problema, ya que tenemos dos casos experimentales que vamos a resolver, por un lado, el mecanizado de los punzones necesarios para la realización del SPIF y por otro, el problema principal que vamos a estudiar que es la realización del SPIF en la placa.

2.1. Realización de los punzones.

2.1.1. Material.

Para la realización de los punzones vamos a utilizar tochos cilíndricos de aluminio, ya que este es fácil de mecanizar, tiene buenos acabados para que la punta del punzón quede perfectamente lisa y así no mecanice la placa si no que la deforme.

Por motivos de ahorro de material, vamos a fabricar en un tocho cilíndrico dos puntas, de manera que en un punzón tendremos dos puntas, es decir, 4 SPIF con cada punzón.

2.1.2. Geometría.

Para la geometría de los punzones vamos a usar tochos cilíndricos de aluminio como ya se ha mencionado antes, con medidas de 70 mm de largo, suficiente para que podamos usar ambas puntas en la fresa y queden bien fijadas para evitar que el punzón se doble y además vamos a realizarlas con un diámetro de 12 mm que son los tochos disponibles en el taller, debido a que las puntas queremos que sean de diámetro 10 mm vamos a realizar estas sobre el tocho de 12 mm quedando así un escalón de diferencia entre ambas medidas, que no afectara para nada a nuestro ensayo.

Exceptuando el punzón que incluye a las puntas esféricas de 10 y 8 mm que ya existía en el taller y que solo tuvimos que reformar, siendo este tocho de 10 mm de diámetro.

Por otro lado, la geometría de las puntas está basada en una forma similar a fresas ya existentes, como son las fresas cónicas, ovoides, paraboloides y las fresas esféricas.

Vamos a realizar 8 puntas diferentes para realizar nuestros ensayos, tres puntas esféricas, tres puntas cónicas y por último dos puntas ovoides, quedando así 4 punzones para realizar los ensayos.

Inicialmente eran 3 puntas solamente, pero por motivos que se aclararán posteriormente se fabricaron otras dos puntas más.

Para poder observar la geometría de las puntas con mayor facilidad se ha realizado unos croquis con ayuda del software Catia que se muestran a continuación:

• **PUNZONES CÓNICOS:**

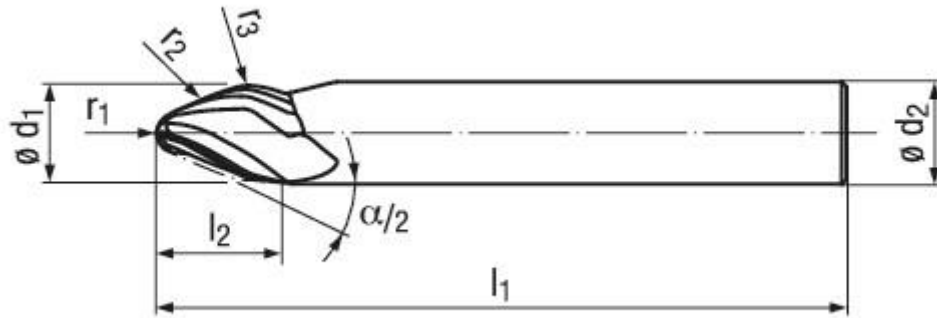


Ilustración 2.1 Fresa cónica

	D1	L2	L1	D2	R1	R2	R3	alfa
Cónico 1	10	9.9	35	12	2	250	5	20
Cónico 2	10	8.3	35	12	1	200	1.5	30
Cónico 3	10	8.3	35	12	3	250	1	30

Tabla 1 Medida de los punzones cónicos

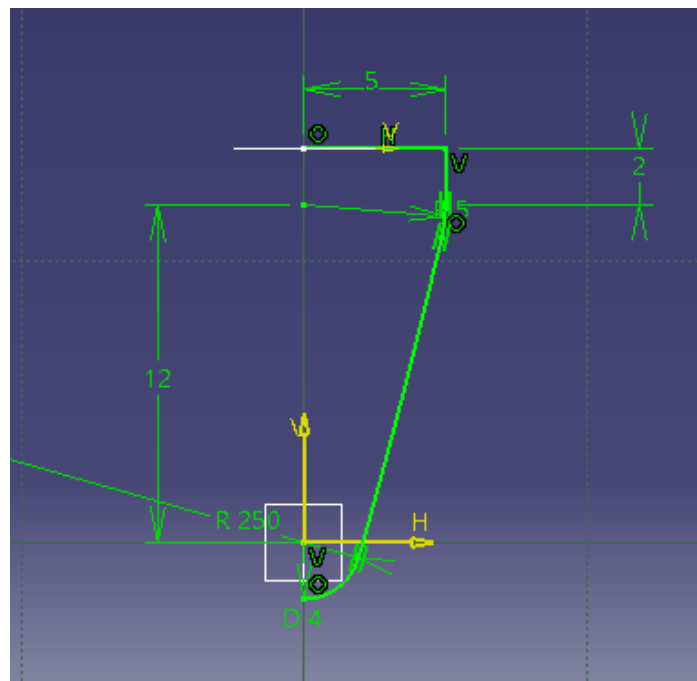
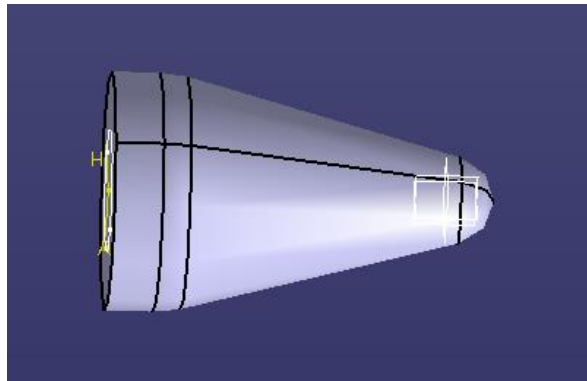
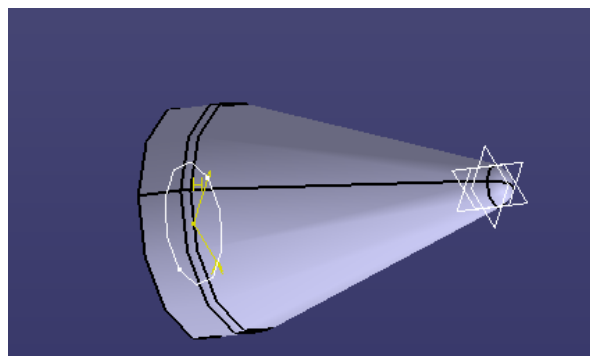
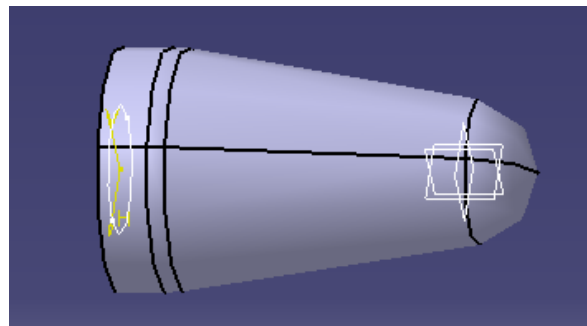


Ilustración 2.2 Punta cónica de radio 2

*Ilustración 2.3 Punta cónica 2**Ilustración 2.4 Punta cónica 1**Ilustración 2.5 Punta cónica 3*

Se puede observar en el diseño previo que la mayor diferencia que existe entre ellos es el radio de la punta, lo cual quiere decir que los parámetros que vamos analizar como rugosidad y acabado superficial los va a determinar este radio de punta.

También se puede observar como como aumentando el radio de punta un solo milímetro el redondeo de la punta varia totalmente a la anterior, veremos más adelante en que afecta este parámetro.

- **PUNZONES ESFÉRICOS:**

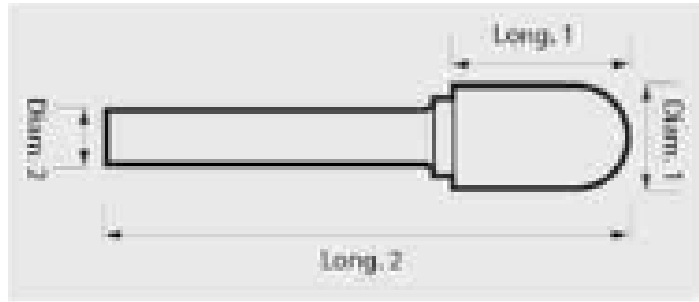


Ilustración 2.6 Fresa esférica

	D1	L2	L1	D2
Esférico 1	10	35	10	10
Esférico 2	12	35	12	12
Esférico 3	8	35	8	8

Tabla 2 Medida de los punzones esféricos

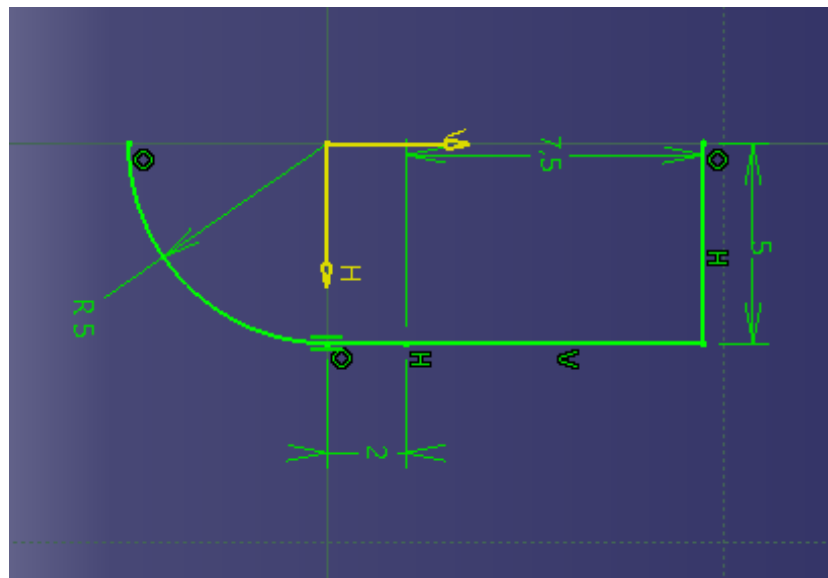
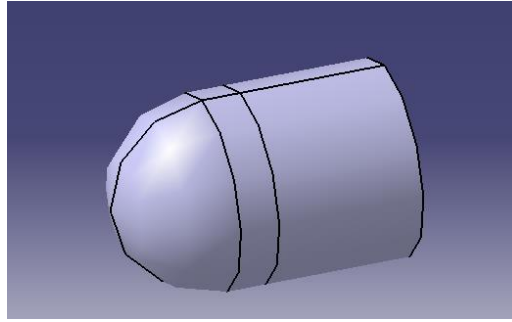
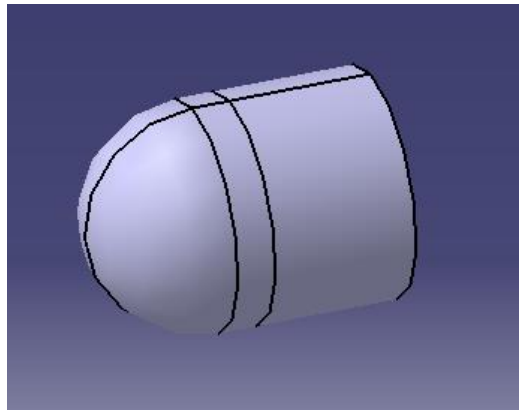
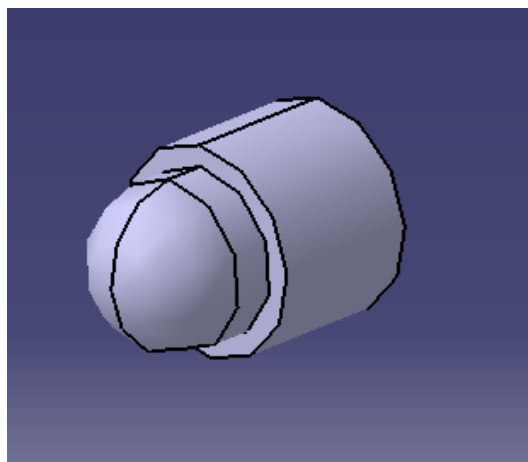


Ilustración 2.7 Punta esférica de radio 10 mm

*Ilustración 2.8 Punta esférica 1**Ilustración 2.9 Punta esférica 2**Ilustración 2.10 Punta esférica 3*

Como se puede observar en este tipo de puntas la forma es prácticamente la misma y el único parámetro que varía es el radio de la esfera de la punta que, cuanto mayor sea mayor será la zona de contacto que hay entre el punzón y la placa, ya veremos más adelante como afectara este parámetro a los acabados.

- **PUNZONES OVOIDE:**

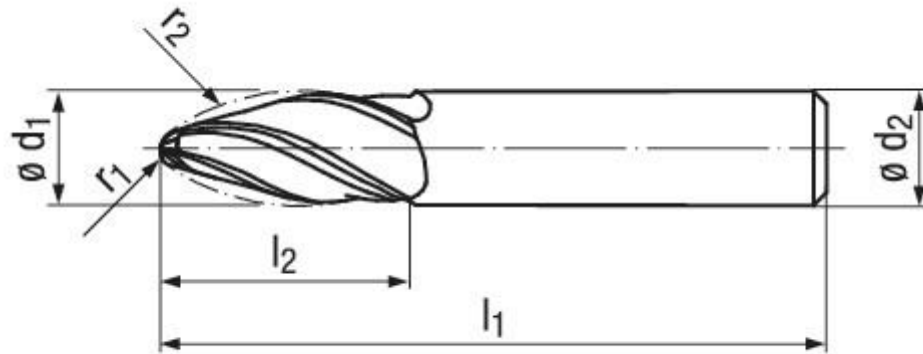


Ilustración 2.11 Fresa ovoide

	D1	L2	L1	D2	R1	R2	Distancia centros
Ovoide 1	10	20	35	12	2	85	20
Ovoide 2	12	20	35	12	3	85	20

Tabla 3 Medida de los punzones ovoide

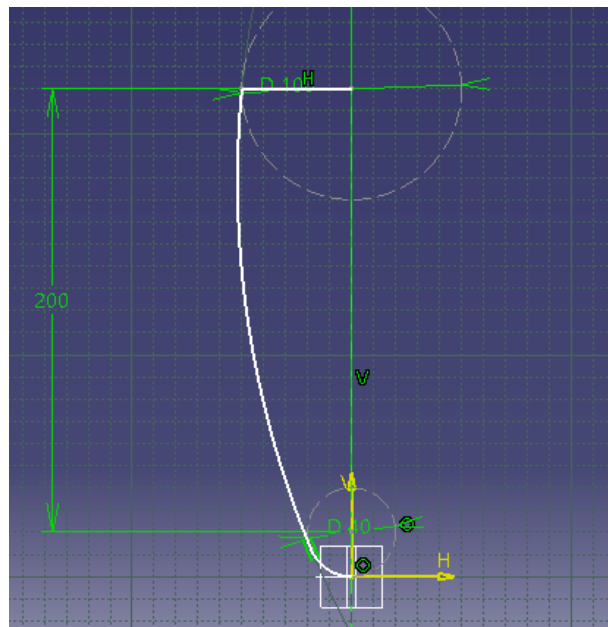
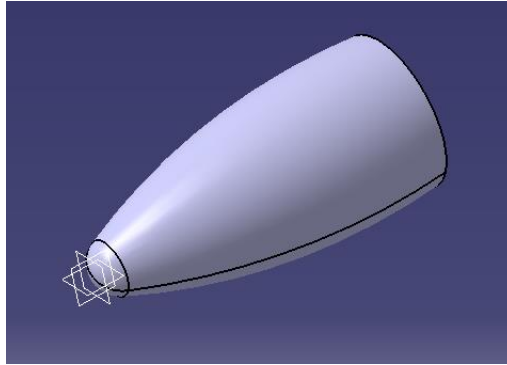
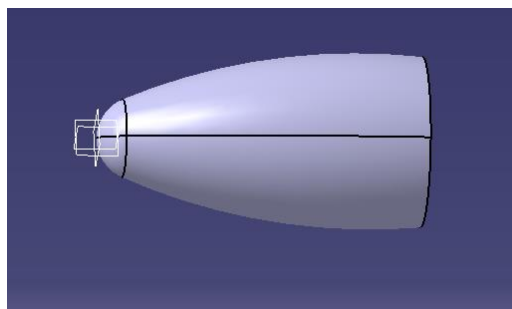


Ilustración 2.12 Punta ovoide de radio 2 mm

*Ilustración 2.13 Punta ovoide 1**Ilustración 2.14 Punta ovoide 2*

Este tipo de puntas podemos observar que se trata de puntas similares a las cónicas por lo que van a tener un comportamiento similar y además también influye notablemente el radio de punta a medida que lo aumentamos, al igual que el caso de las cónicas.

En el caso de las puntas cónicas de menor radio de punta y de las puntas ovoide con poco radio de punta puede ser peligroso realizar ensayos con estas, debido a que su forma de la punta es muy pronunciada y puede mecanizar la placa en vez de deformarla, a medida que aumenta el radio de punta este peligro baja su probabilidad ya que, cuanto más grande es el radio de punta mayor similitud tiene con las puntas esféricas.

Este tipo de detalles se analizará más profundamente posteriormente en desarrollos experimentales.

2.2. Placa para SPIF.

2.2.1. Material

La placa que se va a ensayar va a ser de PVC, debido a que en la Universidad de Jaén se ha trabajado con varios materiales de esta placa en distintos ensayos y diferentes parámetros obteniendo estudios de distintos procesos y se ha concretado que el material que mejor se comporta para este tipo de ensayos se trata del PVC debido a su flexibilidad y facilidad de preparación, además el trabajo de Rubén Cazalla Moral se ha realizado con el mismo material obteniendo unos ensayos correctos.

Con el objetivo de que en trabajos futuros podamos comparar distintos parámetros para el mismo proceso y unificar conclusiones debemos de elaborar estos ensayos en PVC.

Cabe la posibilidad de elegir varios materiales para nuestros ensayos como son chapas de aluminio o cualquier otro acero, pero debido a los parámetros que queremos analizar no es recomendable usar chapas de metal como bien se explicará más adelante.

2.2.2. Geometría.

Con el objetivo de analizar un parámetro más en nuestros ensayos se van a realizar dos geometrías diferentes, una en la que se trata de un tronco de cono con el ángulo sin variar y otra en la que el ángulo del tronco de cono va a ser variable, además podremos ver diferentes casos ya que con una misma punta podemos realizar dos ensayos y obtener resultados mejores para ángulo variable o no con el fin de mejorar trabajos futuros.

La geometría inicial de estas placas es la misma para ambos ensayos, partimos de una placa completamente cuadrada de 3 mm de espesor aproximadamente y 200x200 mm de lado.

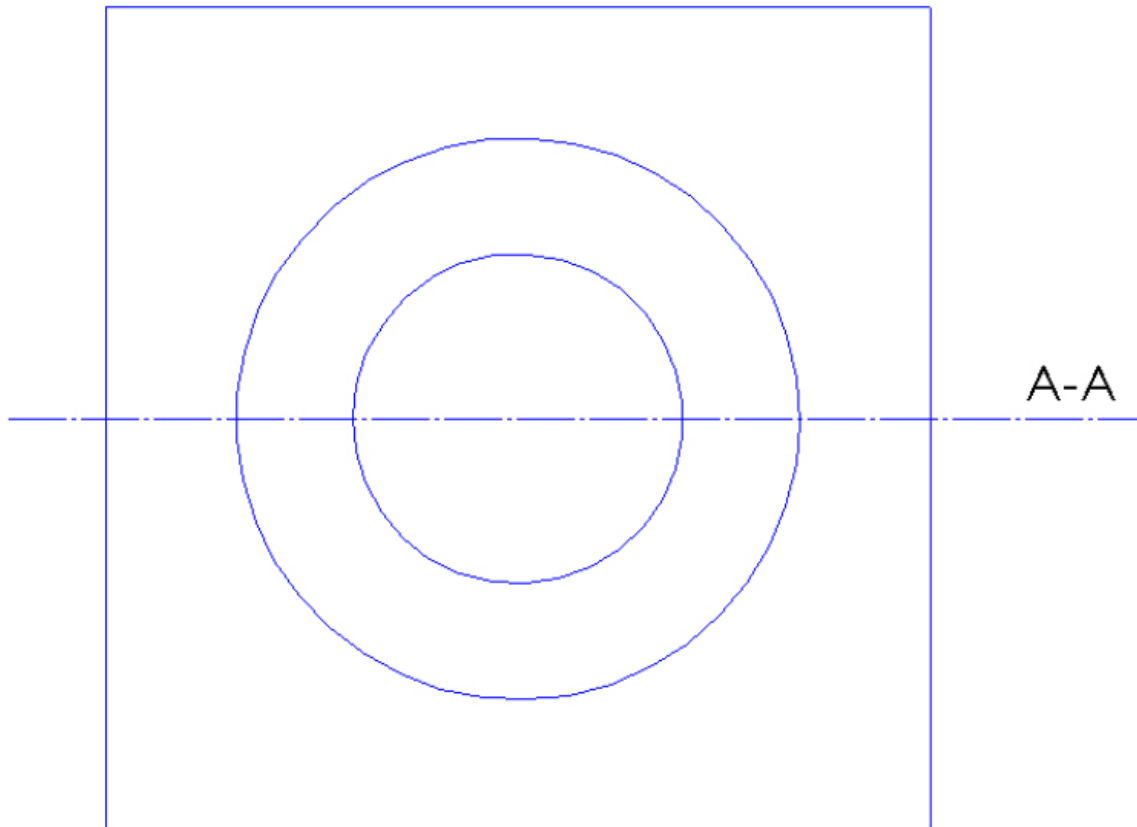


Ilustración 2.15 Geometría a obtener de ambos ensayos

- **TRONCO DE CONO DE ANGULO FIJO:**

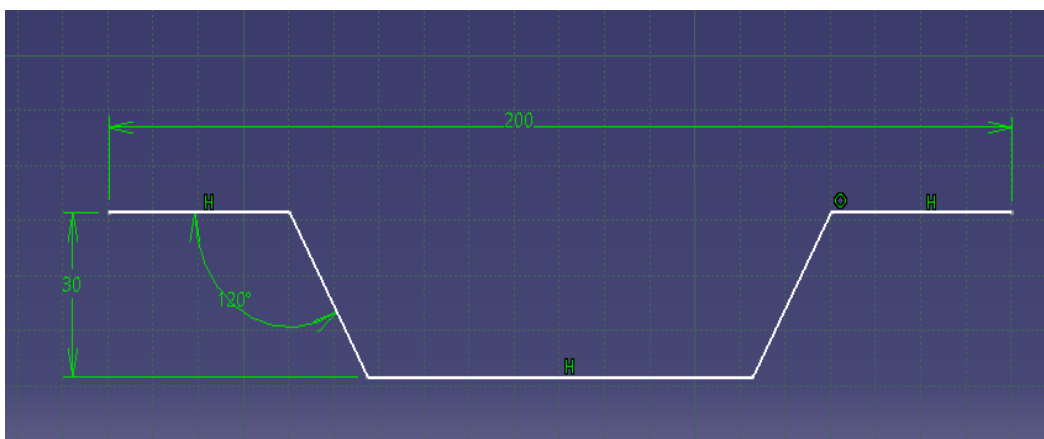


Ilustración 2.16 Geometría 1

La primera geometría que vamos a obtener es un tronco de cono con una profundidad de 30 mm y una pendiente de 60° constante, quiere decir que el ángulo de esta no varía, en todos sus puntos va a tener 60°.

- **TRONCO DE CONO ANGULO VARIABLE:**

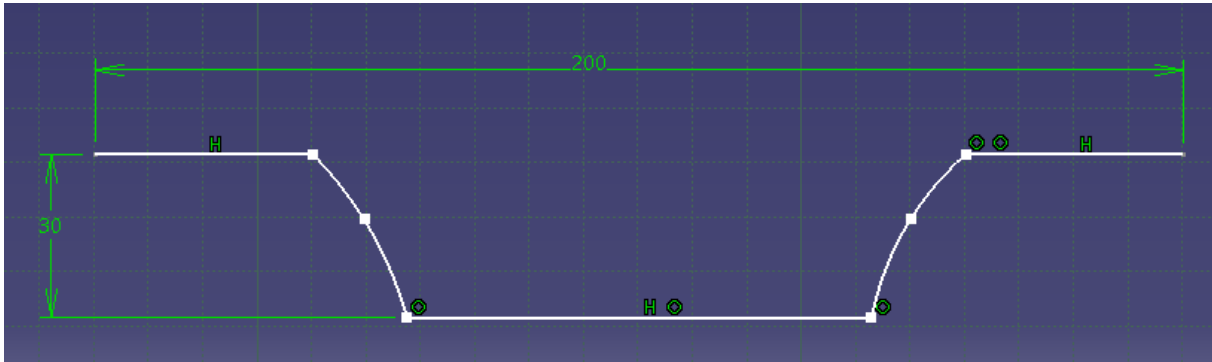


Ilustración 2.17 Geometría 2

La segunda geometría que vamos a realizar es un tronco de cono el cual comienza con un ángulo inicial de 20° e irá variando progresivamente hasta llegar a un ángulo final de 70° .

La profundidad de la placa seguirá siendo la misma que en el caso anterior, lo único que cambia es la pendiente del cono.

Por otro lado, ambas placas se van a realizar como ya hemos visto con la ayuda de una fresa CNC y un punzón que generando circunferencias de distintos diámetros podremos conseguir la forma final. Otro de los parámetros que tendremos que definir es el paso de bajada en cada vuelta de circunferencia que realice la fresa, en ambos casos el paso de bajada en el eje Z es de 0.5 mm ya que la mayoría de los estudios que se han hecho en la Universidad de Jaén son con este parámetro.

2.3. Parámetros tecnológicos.

Existen muchos parámetros que afectan al proceso SPIF en menor o mayor medida. Parámetros geométricos como la profundidad de capa, la trayectoria de la herramienta, el espesor de chapa, la geometría de la pieza o la geometría del punzón; parámetros de funcionamiento como la velocidad de avance, la velocidad de giro de la herramienta o la lubricación; y los materiales del punzón y de la chapa.

La elección de los parámetros incide en la formabilidad y acabado de la pieza, las fuerzas de conformado o la aparición de defectos.

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la geometría de los punzones, por lo que se dejará el resto de parámetros constantes. Se va a estudiar también la geometría de la pieza variando el ángulo de la misma.

Los parámetros que vamos a dejar constantes y por lo que van a determinar las condiciones del ensayo son los siguientes, un incremento de bajada de 0.5 milímetros, la trayectoria de la herramienta va a ser circular, materiales con los que vamos a trabajar es aluminio para los punzones y PVC para los ensayos, vamos a lubricar cada placa para evitar con esto efectos de la temperatura además de que la velocidad de avance va a ser una velocidad moderada de 1500 mm/min y con la herramienta libre para así disminuir por completo el efecto de la temperatura.

La relación entre la lubricación y la velocidad de giro de la herramienta afectaría mucho a la temperatura añadiéndonos un factor adicional que no queremos que sea condicionante para nuestros ensayos es por eso que se eliminará la temperatura lo máximo posible.

La influencia se va a medir con acabado y con fuerzas de conformado.

Las fuerzas que intervienen en el proceso es un parámetro fundamental ya que la forma de la punta determinara unas fuerzas distintas para cada ensayo y necesitaremos conocerlas para determinar cuál es la geometría para cada caso y así obtener conclusiones. Esta fuerza va a ser medida mediante una mesa dinamométrica que se acoplara al montaje en el CNC la cual procesa los datos en un ordenador y nos muestra los datos de fuerza que necesitamos y que posteriormente trataremos.

Otro parámetro fundamental será el acabado superficial para cada ensayo, para determinar esto hay muchas formas de obtenerlo, nosotros hemos optado por medir la rugosidad superficial de cada ensayo con un rugosímetro disponible en el laboratorio, este dato nos dará una idea de cómo cada tipo de punta afecta en acabado a diferentes ensayos.

Por otro lado, decir que existen múltiples parámetros que abarcar y que estudiar en este tipo de procesos y que lógicamente no podemos estudiarlos todos a la vez, pero nos llevaría a adoptar otras condiciones de ensayo que no nos conviene mezclar con las nuestras.

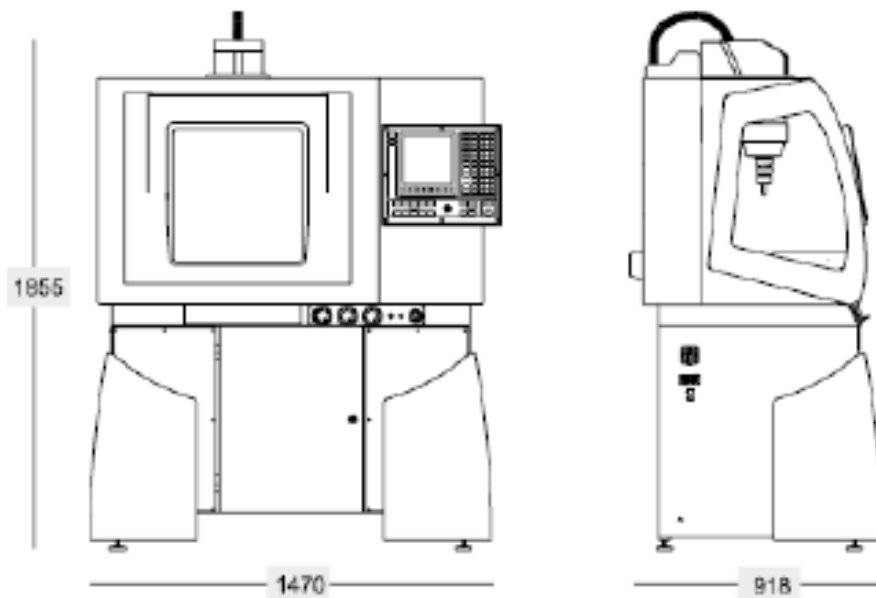
El objetivo de estos ensayos es determinar factores que influyen notablemente en este tipo de procesos para posteriormente compararlos entre ellos y así poder determinar conclusiones acertadas sobre el SPIF y que nos permitan evolucionar en este proceso.

2.4. Material necesario.

Para poder realizar los ensayos necesarios vamos a especificar las características de cada maquinaria que vamos a utilizar y que son necesarias para realizar los ensayos correctamente, para la realización de las puntas simplemente es necesario un torno didáctico CNC disponible en el taller de la Universidad de Jaén. Para la realización de los ensayos es necesario una fresadora controlada numéricamente una mesa dinamométrica mencionada antes para medir fuerzas durante el ensayo, un sistema de sujeción de la placa y un rugosímetro para el post-ensayo.

2.4.1. Fresadora CNC.

Se trata de una máquina fresadora controlada numéricamente y que se usa en la Universidad de Jaén para la docencia por tanto su uso es libre, a esta máquina le vamos a acoplar un sistema de sujeción creado para hacer SPIF y que introduciendo el código correspondiente va a realizar nuestra trayectoria del SPIF. Se trata de un modelo ODISEA de la marca ALECOP y cuya ficha técnica se muestra a continuación:



Recorrido en el eje longitudinal X	200 mm
Recorrido en el eje transversal Y	200 mm
Recorrido en el eje vertical Z	200 mm
Dimensiones de la mesa de trabajo	450x180 mm
Distancia máxima cabezal/ mesa	320 mm
Conicidad del husillo	ISO 30
Motor del cabezal	Asíncrono trifásico de 1,5 kW
Velocidad de giro del cabezal	de 100 a 4000 rpm
Cono del cabezal	ISO 30
Motores de accionamiento de ejes	CC (1.44 Nm)
Avance rápido	5000 mm/min
Resolución electrónica	0,001 mm
Apertura de puerta	Automática
Tensión de alimentación monofásica	230V 50/60Hz
Dimensiones	1470x 918x 1855 mm
Peso aproximado	550 Kg

Ilustración 2.18 Ficha técnica fresadora CNC

Para introducir el código numérico en la fresadora dispone de un cable de datos el cual está conectado a nuestro ordenador y desde ahí podremos pasar el código para ejecutarlo, una vez pasado y renombrado la fresadora guardara nuestro código para ejecutarlo las veces que sea necesario.

2.4.2. Punzones.

Como ya se ha mencionado antes se fabricarán varios punzones con diferentes geometrías de punta, tres esféricas, tres cónicas y dos ovoides. Estos punzones se acoplarán al portaherramientas equivalente, usaremos el de 10 y 12 mm de diámetro ya que dispones de punzones con estas medidas.

Una vez hemos colocado el punzón en el portaherramientas, este se colocará en la maquina CNC para que podamos realizar el ensayo. La máquina CNC tiene un sistema automático de sujeción mediante el cual fija el portaherramientas al husillo. Recordar también que este portaherramientas no girará ya que no queremos que influya la temperatura.

2.4.3. Sistema de sujeción.

Para poder realizar el ensayo correctamente y que la placa de PVC sobre la que se va a realizar el SPIF quede fija necesitamos realizar un montaje específico para SPIF el cual nos permite fijar la placa durante el ensayo y evitar que se mueva.

Para montarlo, sobre la mesa dinamométrica, una vez se haya colocado esta sobre la base de la fresadora, se colocará una base fabricada por la Universidad de Jaén, la cual consta de un soporte para poder fijarlo a la mesa dinamométrica, a continuación, una base sobre la cual se sostendrá la placa. Esta base contiene un agujero en el centro para servir como guía del SPIF de diámetro 140 mm suficiente para realizar nuestros ensayos.

A continuación, se colocará la placa PVC encima de la base y que ira sujeta por una última plancha de acero que se colocará sobre la placa. Finalmente fijaremos los tornillos y al apretar estos la placa de PVC quedara fija sobre el soporte.

Cabe destacar que la Universidad de Jaén disponen de dos modelos de soporte fabricados para realizar este tipo de ensayos, un soporte bajo, para realizar troncos de cono de menor altura (que es el que se usa en este trabajo) y otro más alto para realizar troncos de cono con más profundidad.

A continuación, se muestra en un esquema el montaje que se realizó para poder ejecutar los ensayos:

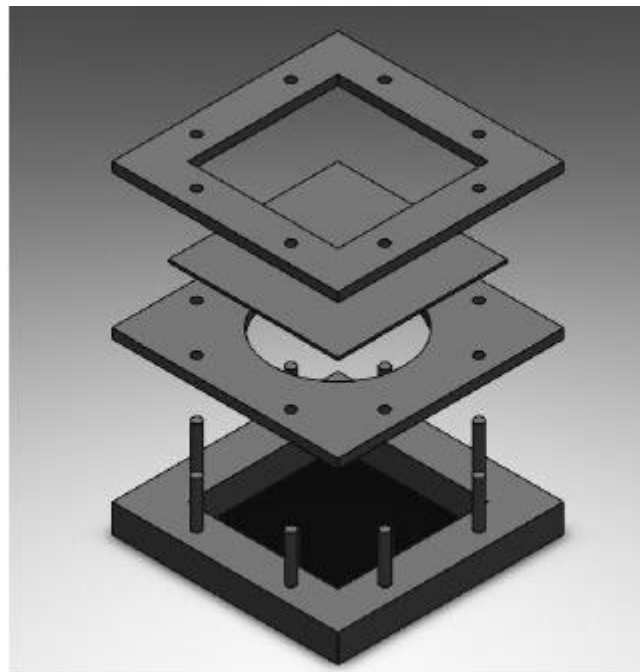


Ilustración 2.19 Soporte fijación de placa PVC

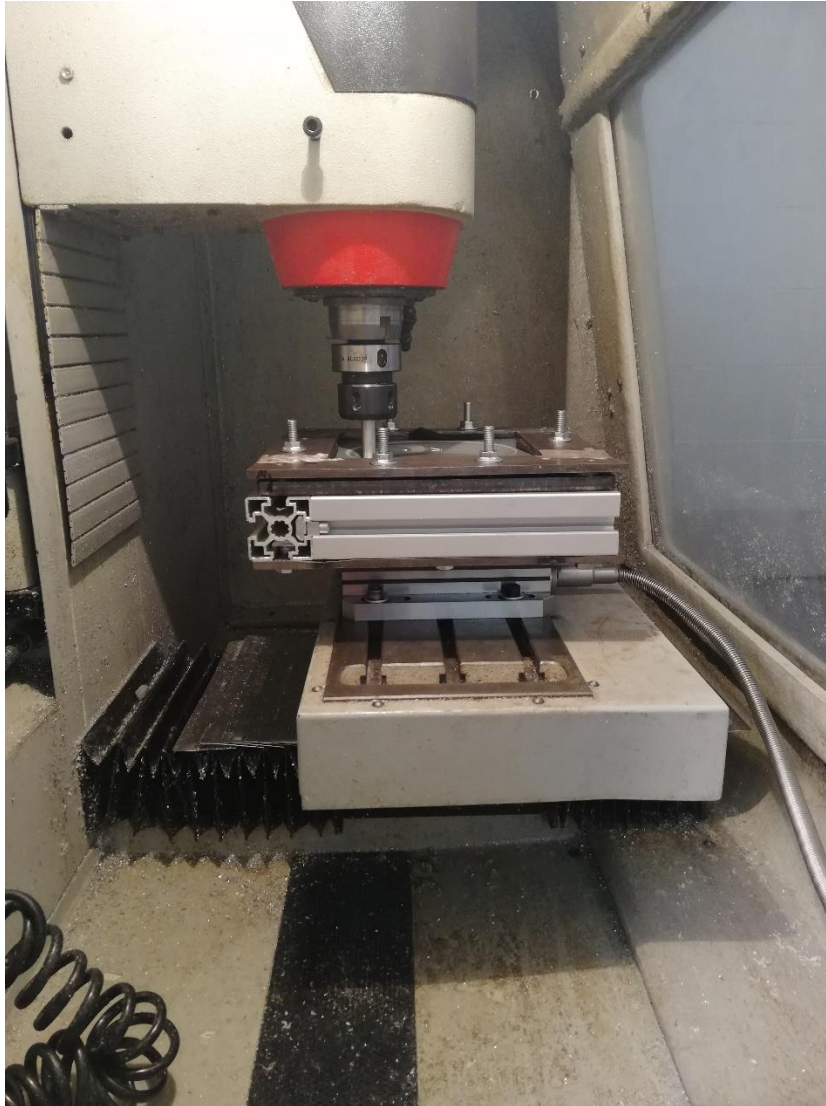


Ilustración 2.20 Montaje real del soporte de fijación

2.4.4. Mesa dinamométrica.

Bajo el soporte que se ha explicado anteriormente se fijara la mesa dinamométrica la cual se encargara de medir las fuerzas en los tres ejes cartesianos, X, Y, Z. Esta mesa está disponible en el taller y se trata de una mesa dinamométrica marca KISTLER modelo 9257BA. El montaje que se realiza es el siguiente:

Primero colocamos la mesa dinamométrica sobre la base de la fresa CNC, sobre esta mesa se fijará mediante unos pernos el soporte de fijación.

A continuación, conectamos el cable de datos a la mesa dinamométrica y llevando este cable a la CPU de datos, esta se encargará de limpiarlos de ruido y proporcionar datos limpios.

- Esta mesa de datos ira conectada a un osciloscopio capaz de medir las fuerzas y por otro lado la conectaremos a el ordenador que se encargara de recoger los datos de fuerza medidos y guardarlos en un archivo de texto txt.

Se muestra a continuación un esquema del montaje de la mesa dinamométrica, así como el montaje completo de todas las herramientas para realizar el ensayo.

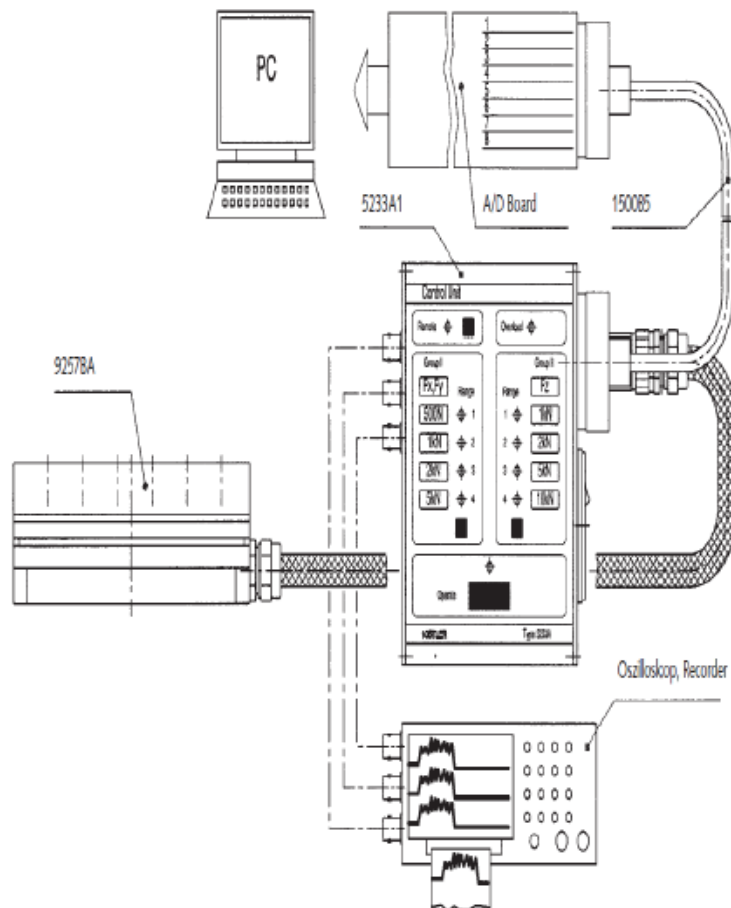


Ilustración 2.21 Sistema de medición de fuerzas

Dynamometer Type 9257BA

Range 1	F_x, F_y	kN	-0.5 ... 0.5
	F_z	kN	-1 ... 1
Range 2	F_x, F_y	kN	-1 ... 1
	F_z	kN	-2 ... 2
Range 3	F_x, F_y	kN	-2 ... 2
	F_z	kN	-5 ... 5
Range 4	F_x, F_y	kN	-5 ... 5 ¹⁾
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-5 ... 10 ²⁾
Overload	F_x, F_y, F_z	kN	-7,5/7,5
	F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	kN	-7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	mV/N	10,0
	F_z	mV/N	5,00
Linearity, all ranges		% FSO	± 1
Hysteresis, all ranges		% FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 3$
Rigidity	c_x, c_y	kN/ μ m	>1
	c_z	kN/ μ m	>2
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x,y)$	kHz	$\approx 2,0$
	$f_n(z)$	kHz	$\approx 3,5$
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Drift (charge amplifier) at 25 °C	F_x, F_y	N/s	$\pm 0,005$
	F_z	N/s	$\pm 0,01$
Ground isolation		M Ω	>100
Connecting cable (integral)	l	m	5
Degree of protection			IP 67
Weight		kg	7,4

¹⁾ Application of force inside and max. 25 mm above top plate area.

²⁾ Range for turning, application of force at point A.

Control Unit Type 5233A1

Number of channels		3
Number of ranges per channel		4
Output signal	V	± 5
Cut-off frequency of the built-in filter	Hz	200
Output connector	3x8NC neg, 37 pin D-Sub	
Operating temperature range	°C	0 ... 60
Power supply (switchable)	V/AC	230/115
	%	+15/-22
Power consumption	VA	<23
Dimensions	mm	170x126x55
Weight	kg	1,52

Ilustración 2.22 Ficha técnica de la mesa dinamométrica



Ilustración 2.23 Montaje completo para la realización del SPIF

2.4.5. Rugosímetro.

Una vez que hemos realizado los ensayos, es necesario un rugosímetro para poder medir uno de los parámetros que es el acabado superficial, para ello vamos a usar un rugosímetro marca MITUTOYO modelo SJ-210 que se encuentra disponible en el laboratorio de metrología de la EPS. Este rugosímetro consta de varias piezas para medir la rugosidad, por un lado, tendremos el rugosímetro digital que nos muestra la medida de la rugosidad, mediante un cable se encuentra conectado a un soporte el cual este se le conecta el palpador, que será el encargado de realizar la medición.

Todo esto se monta en unos soportes junto con las placas un nuestro ensayo y podremos realizar la medición de la rugosidad, esta medición el rugosímetro ya te la muestra directamente en micrómetros.

Cabe destacar que, es muy importante calibrar y ajustar la longitud de onda del rugosímetro ya que si no se hace correctamente la medida será errónea. Para calibrarlo el rugosímetro dispone de una placa con rugosidad 0.3 micras, y que simplemente con medir la placa 2 o 3 veces esta calibrado.

Para ajustar la longitud de onda es necesario realizar la primera medición, y seguir el esquema que se muestra a continuación:

$$0.1 < Ra \leq 2.0 \mu\text{m} \rightarrow \lambda_c = 0.8 \text{ mm}$$

$$2.0 < Ra \leq 10.0 \mu\text{m} \rightarrow \lambda_c = 2.5 \text{ mm}$$

$$10.0 < Ra \leq 80.0 \mu\text{m} \rightarrow \lambda_c = 8 \text{ mm}$$

Donde Ra es el rango de muestreo y λ_c es la longitud de onda.

A continuación, se muestra la ficha técnica del rugosímetro, así como un esquema del montaje necesario para la medición de la rugosidad.



Ilustración 2.24 Esquema de medición de rugosidad

Surftest SJ-210
SERIE 178- Medidor Portátil de Rugosidad Superficial



Ilustración 2.25 Rugosímetro MITUTOYO

ESPECIFICACIONES

Modelo No.	Unidad conductora Estándar		Unidad conductora Retráctil		Unidad conductora recorrido transversal		
	SI-210 (tipo 0.75mN)	SI-210 (tipo 4mN)	SI-210 (tipo 0.75mN)	SI-210 (tipo 4mN)	SI-210 (tipo 0.75mN)	SI-210 (tipo 4mN)	
Código No.	mm	178-560-01A	178-560-02A	178-562-01A	178-562-02A	178-564-01A / 178-564-02A	
	Precio USD	\$2,390.00			\$2,710.00		
	μg/mm	178-561-01A	178-561-02A	178-563-01A	178-563-02A	178-565-01A / 178-565-02A	
	Precio USD	\$2,390.00	\$2,390.00	\$2,710.00	\$2,710.00	\$4,460.00	
Intervalo de medición	Eje X	16.0 mm				5.6 mm	
	Detector	360 μm / 0.200 μm a +160 μm					
	Intervalo	360 μm / 0.02 μm, 100 μm / 0.006 μm, 25 μm / 0.002 μm					
	Intensidad/Resolución	360 μm / 0.02 μm, 100 μm / 0.006 μm, 25 μm / 0.002 μm					
Velocidad de medición	Cuando se mide: 0.25mm/s, 0.5mm/s, 0.75mm/s Retroceso: 1mm/s						
Fuerza de medición/ Forma del palpador	Depende del Código No.: 0.75mN/60°, 2μmR (Cuando el código No. termina con "-01") 4mN/90°, 5μmR (Cuando el código No. termina con "-02")						
Fuerza de la guía	400mN o menos						
Normas aplicables	ISO1982/ ISO1994/ ISO2001/ ISO1993/ ANEQL VDA						
Perfiles evaluados	Perfil primario "P", perfil de rugosidad "R", perfil DE, perfil de rugosidad motif						
Parámetro	Ra, Rq, Rz, Rz, Rq, Rq, Rmax, Rp, Rv, Rz, Rsk, Rku, Rr, Rrc, Rsm, Rz1max, S, HSC, Rz1S, Rpo, RDa, Rdq, Rq, Rrm, Rrm(c), R c, Rk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo, Rpm, tp, Htp, R, Rv, AR, Personalización posible						
Gráficas de análisis	Curvas BAC y ADC						
Filtro	Gaussiano, ZCR75, PC75						
Longitud de Cut-off	λc	0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm					
	λs ^{MS}	2.5, 8 μm					
Longitud de muestreo	0.08, 0.25, 0.8, 2.5 mm						
Número de longitudes de muestreo	x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, Longitud arbitraria (0.3 a 16.0mm: 0.01mm intervalo)				x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9, x10, Longitud arbitraria (0.3 a 5.6mm: 0.01mm intervalo)		
Dimensiones de LCD	36.7x48.9 mm						
Idioma en pantalla	Soporta 16 idiomas (Japonés, Inglés, Alemán, Francés, Italiano, Español, Portugués, Holandés, Polaco, Húngaro, Sueco, Checo, Chino Simplificado, Chino tradicional, Coreano, Turco)						
Pantalla de Resultado del Cálculo	Pantalla vertical: 1 fila/ 3 filas/ indicador Pantalla horizontal: 1 columna/ 4 columnas/ indicador (pantalla izquierda/derecha disponible)						
Funciones de impresión *1	Condición de medición/ Resultado de cálculo/ Resultado del cálculo por segmento/ Perfil evaluado/ curva de área del material/ curva de distribución de amplitud/ artículos de configuración ambiental						
Funciones externas I/O	USB VIF, salida Digmatic, salida de impresión, RS-232C VIF, interruptor de pie VIF						
Personalización	Se pueden seleccionar los parámetros del cálculo de la pantalla.						
Función ajuste RGA/RGA*2	Regla de valor máximo, regla de 16%, regla del valor medio						
Condición de almacenamiento de la medición	Cuando está apagado						
Función Almacenamiento	Memoria integrada: Condición de medición (Hasta 10) Tarjeta de memoria (opcional): 500 condiciones de medición, 10,000 perfiles medidos, 500 imágenes en pantalla, Archivos de texto (condición de medición/ Datos de medición/ Perfil evaluado/ curva del área del material/ curva de distribución de amplitud)						
Calibración	Autocalibración con la entrada de valor numérico / Calibración promedio con mediciones múltiples (Máximo 5 veces) disponible.						
Función de ahorro de energía	Apagado automático (puede establecerse de 10 a 600 segundos) *3						
Fuente de alimentación	Batería Integrada (Recargable de Ni-MH) / Adaptador AC Tiempo de carga de la batería integrada: entre 4 horas (puede variar de acuerdo a la temperatura ambiente) Resistencia: alrededor de 100 mediciones (difiere de acuerdo a condiciones de uso/ ambiente)						
Dimensiones externas (UxLxD)	Unidad de control	52.1x65.8x160 mm (Cubierta deslizable cerrada, detector no montado)					
	Unidad conductora	115x23x26 mm (Excluyendo el detector)					
Peso	Aprox. 500g (Unidad de control, unidad conductora, detector estándar)						
Accesorios estándar	12BAA303	Cable conector *4				12BAA303	Cable conector *4
	178-601 12BAK699 12BAK700	Muestra de rugosidad Estuche Plataforma de calibración				178-605 12AAE643 12AAE644 12BAK699 12BAK700	Muestra de rugosidad Adaptador punto de contacto Adaptador tipo V Estuche Plataforma de calibración
	Adaptador AC, Manual de operación. Manual de una página, Tarjeta de garantía.				12BAK700 Plataforma de calibración Lámina protectora de la pantalla Adaptador AC, Manual de operación. Manual de una página, Tarjeta de garantía.		

Ilustración 2.26 Ficha Técnica rugosímetro

2.4.6. Torno CNC.

Para poder realizar los punzones y las puntas es necesario un torno controlado numéricamente. Se va a usar un torno didáctico disponible en el taller marca ALECOP modelo ECLIPSE, de la misma familia que la fresadora.

Para proceder a realizar los punzones se cortaron con la ayuda de una sierra eléctrica tochos cilíndricos. Estos tochos se introducen en el torno CNC y que con la ayuda de un código ISO previamente fabricado y leído por el torno se procederá a la fabricación de las distintas puntas que son necesarias para los ensayos.

A continuación, se muestra la ficha técnica del torno CNC:



Ilustración 2.27 Torno eclipse CNC

Características técnicas

Diámetro de volteo sobre bancada	230 mm
Distancia entre puntos	530 mm
Recorrido longitudinal Z	275 mm
Recorrido transversal X	96 mm
Motor de cabezal	Asíncrono trifásico de 1,5 Kw
Velocidad de giro del cabezal	50 - 4000 rpm
Motores de accionamiento de ejes	5000 mm/min
Torreta portaherramientas de	8 posiciones (12 x 12 mm)
Resolución electrónica	0,001 mm
Apertura de puerta	Manual/Automática
Tensión de alimentación monofásica	230 V 50/60 Hz
Potencia instalada	1,9 KW
Dimensiones	1470 x 620 x 1540 mm
Peso aproximado	400 kg



Material: Acero F1100
Velocidad de corte: 200 m/min
Avance: 0.15 mm/vuelta
Profundidad de pasada: 1.5 mm



Material: Aleación de aluminio COBRAL 11 T3
Velocidad de corte: 250 m/min
Avance: 0.2 mm/vuelta
Profundidad de pasada: 2 mm

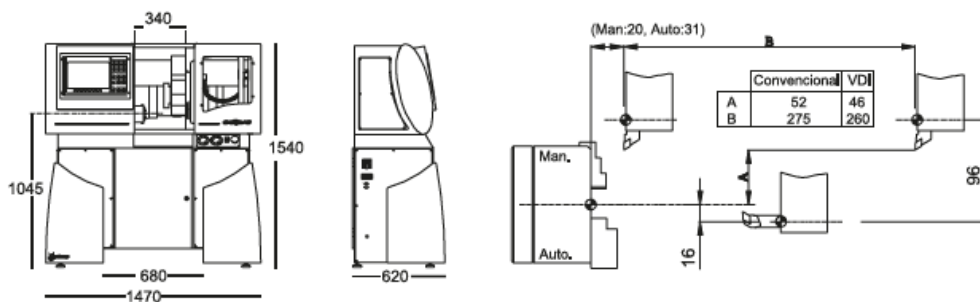


Ilustración 2.28 Ficha técnica eclipse CNC

2.4.7. Software complementario.

Para poder realizar los programas que vamos a introducir tanto en la fresa para realizar el SPIF como en el torno para la fabricación de puntas se han usado varios programas para facilitar la elaboración del código ISO. Para la elaboración del código del torno para la fabricación de puntas se ha usado el software WinUnisoft y para el código de la fresa que realizara el SPIF se ha usado la herramienta Excel.

- **Catia:** mediante este programa se han realizado los diseños pertinentes de todos los punzones para su posterior fabricación, además este software nos permite un modulo mediante el cual realiza la programación en código ISO automáticamente pero que no se ha usado ya que la programación se ha hecho de manera manual.

- **WinUnisoft:** es un programa de simulaciones, una vez se ha elaborado el código ISO a mano, se puede introducir en este programa y obtener una simulación de la trayectoria que va a seguir el torno CNC o la fresa CNC, así como la corrección de errores para la posterior ejecución. Este programa, además, tiene una herramienta que nos permite mandar el programa del PC a la fresa o el torno, dependiendo de donde tengamos el cable de datos conectado.

Este programa se ha usado tanto para la elaboración del código que fabrica las puntas como para la simulación y corrección del código que realiza el SPIF.

- **Excel:** la herramienta Excel se ha usado para facilitar la elaboración del código que realizara el SPIF, al ser un proceso muy repetitivo el código es muy largo por con la ayuda de este software se facilita mucho la elaboración.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Una vez se ha preparado todo el material y herramientas necesarias para realizar los ensayos en este capítulo se explicará todo lo relacionado con los ensayos experimentales, preparativos para realizarlos, proceso de ensayo en sí y post-procesado.

3.1. Diseño de ensayos

Se ha planificado realizar un total de 16 ensayos variando la geometría de la herramienta y además de la placa que vamos a ensayar como ya se ha explicado anteriormente. Tendremos parámetros comunes en todos ensayos los cuales son los siguientes:

- Altura de bajada: 0,5 mm
- Trayectoria herramienta: circular de radio variable
- Velocidad de avance: 1500 mm/min
- Material de las herramientas: Aluminio

- Material de las placas: PVC
- Lubricación: Sí
- Giro de la herramienta: Libre
- Espesor de la placa: 3 mm

Para facilitar el proceso de numeración de los ensayos y así tener claro que tipo de ensayo se han realizado se ha construido la siguiente tabla donde se detallan las características de cada ensayo:

ENSAYO	FORMA PUNTA	TRAYECTORIA
1.1	Ovoide Radio 3 mm	Ángulo fijo
1.2	Cónica Radio 3 mm	Ángulo fijo
1.3	Esférica D12	Ángulo fijo
1.4	Esférica D10	Ángulo fijo
1.5	Esférica D8	Ángulo fijo
1.6	Ovoide Radio 3 mm	Frustrum
1.7	Cónica Radio 3 mm	Frustrum
1.8	Esférica D12	Frustrum
1.9	Esférica D10	Frustrum
1.10	Esférica D8	Frustrum

Tabla 4 Planificación de los ensayos

3.2. Generación del código ISO.

El primer paso para realizar los ensayos y de forma preparativa, se ha de elaborar el código ISO, tanto para generar la geometría del SPIF como para generar el movimiento para la fabricación de los punzones. Estos códigos se han elaborado mediante el software WinUnisoft y con la ayuda de Excel.

3.2.1. Generación código ISO para punzones.

Para generar el código ISO de cada punzón es necesario sacar las coordenadas de los puntos iniciales y finales que marcan la geometría de la punta, para ello vamos a analizar las tres geometrías que vamos a fabricar.

- **PUNZONES CÓNICOS:**

Para generar las puntas cónicas es necesario estudiar la geometría de las puntas, para ello vamos a analizar la punta cónica de radio 2 mm y sus variantes se realizarán de manera similar.

La geometría de las puntas cónicas se basa principalmente en un cono con una pendiente determinada y una circunferencia de un radio determinado, el cual marcará el radio de punta de la herramienta, tangente a dicho cono. Para que el cono tenga de diámetro 10 mm y además sea tangente a una circunferencia de diámetro 4 mm la pendiente del cono ha de ser 20° como se muestra a continuación:

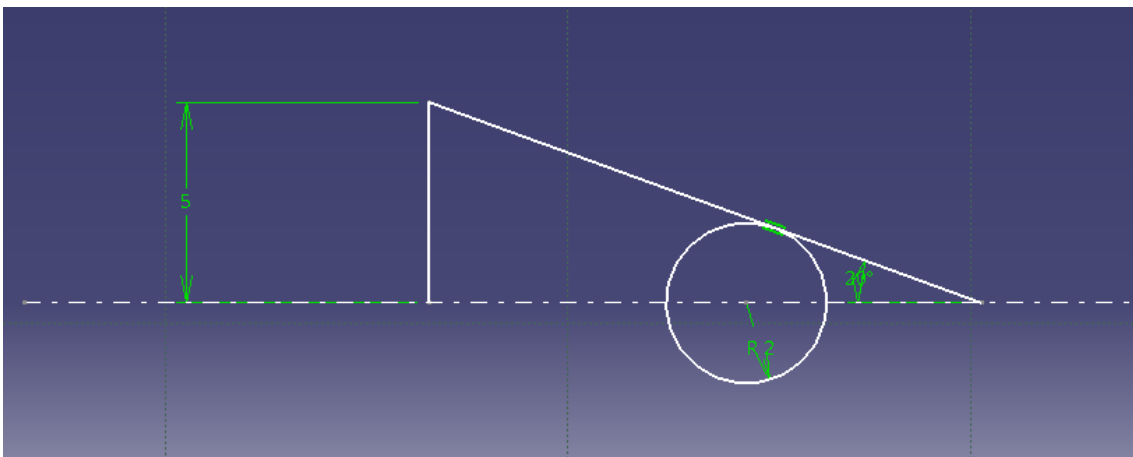


Ilustración 3.1 Geometría de la herramienta cónica

Una vez se ha determinado la geometría de la que vamos a partir basta con aplicar trigonometría básica para sacar las coordenadas Z1 y X1 que necesitamos para realizar nuestro código ISO.

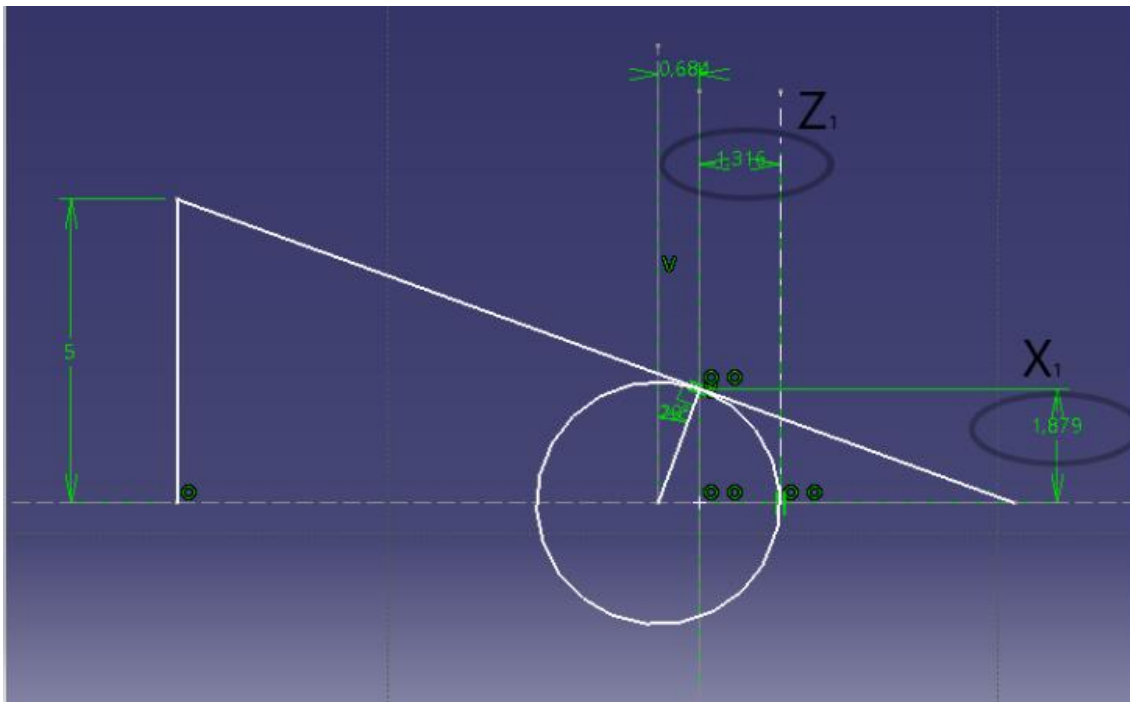


Ilustración 3.2 Coordenadas de la herramienta cónica

Como sabemos que la circunferencia tiene un diámetro de 2 mm podemos plantear las siguientes ecuaciones para definir las coordenadas X1 y Z1:

$$X1 = \frac{D(\text{circunferencia})}{2} \cdot \cos 20$$

$$Z1 = \frac{D(\text{circunferencia})}{2} - 2 \cdot \sin 20$$

De esta forma ya tenemos las coordenadas que necesitamos saber para definir la circunferencia que vamos a realizar en código ISO, recalcar que para introducir la coordenada X en WinUnisoft debemos de multiplicarla por 2.

Una vez hecho esto nos queda por determinar las coordenadas finales X2 y Z2 que necesitaríamos para nuestro código:

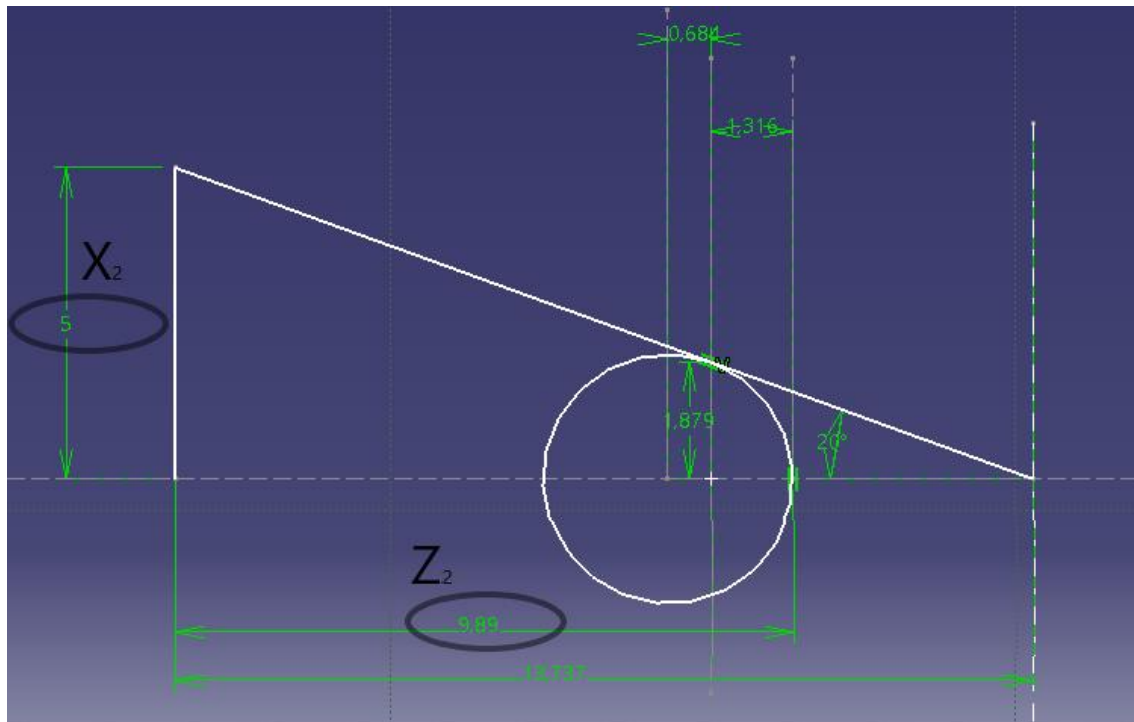


Ilustración 3.3 Coordenadas de la herramienta cónica 2

La coordenada X2 la conocemos ya que sabemos el radio de la herramienta que queremos que sea de 10 mm. Para conocer la coordenada Z2 es necesario aplicar de nuevo trigonometría básica. De manera que conociendo el largo del cono y además la distancia desde la punta hasta el final del cono restándolas obtendremos la coordenada final.

De esta forma se pueden establecer las siguientes fórmulas para las coordenadas finales:

$$X2 = D(\text{herramienta})$$

$$Z1 = \frac{X2/2}{\tan 20} - \left(\frac{X1}{\tan 20} - Z1 \right)$$

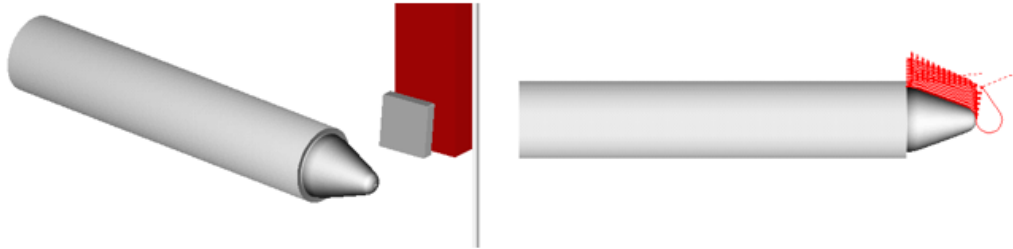
Una vez sacadas las fórmulas generales que gobiernan la geometría de la punta ya podemos realizar tantas puntas como queramos con el radio de punta que deseemos, en este caso se ha realizado tres puntas cónicas de radios de punta 1, 2 y 3 mm las cuales se muestran a continuación con su código ISO generado:

Punzón cónico radio punta 2mm (cónico 1)

```

N010 G54 X0 Z70
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X10 Z1
N041 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K4.5 P5=K0.2 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K0
P13=K100 P14=K125
N080 G00 X10 Z1
N090 G01 G37 R2 X0 Z0
N100 G03 X3.758 Z-1.316 R2
N110 G03 G36 R5 X10 Z-9.89 R250
N120 G01 X10 Z-10 |
N125 G01 X12 Z-10
N130 G00 X14 Z1
N140 M30

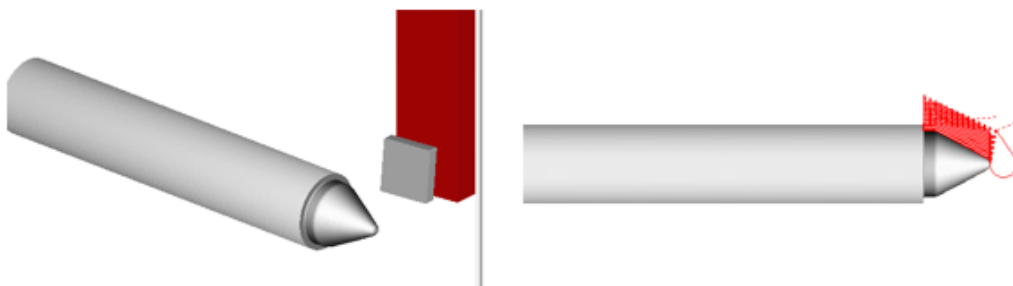
```

*Ilustración 3.4 Generación punta cónica 1***Punzón cónico radio punta 1mm (cónico 2)**

```

N010 G54 X0 Z70
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X10 Z1
N041 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K4.5 P5=K0.2 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K0
P13=K100 P14=K125
N080 G00 X10 Z1
N090 G01 G37 R2 X0 Z0
N100 G03 X1.732 Z-0.5 R1
N110 G03 G36 R1.5 X10 Z-8.294 R200
N120 G01 X10 Z-10
N125 G01 X12 Z-10
N130 G00 X14 Z1
N140 M30

```

*Ilustración 3.5 Generación punta cónica 2*

Punzón cónico radio punta 3mm (cónico 3)

```

N010 G54 X0 Z50
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X10 Z1
N041 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K4.5 P5=K0.2 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K0
P13=K100 P14=K125
N080 G00 X10 Z1
N090 G01 G37 R2 X0 Z0
N100 G03 X5.638 Z-1.974 R3
N110 G03 G36 R5 X10 Z-7.9662 R250
N120 G01 X10 Z-10
N125 G01 X12 Z-10
N130 G00 X14 Z1
N140 M30

```

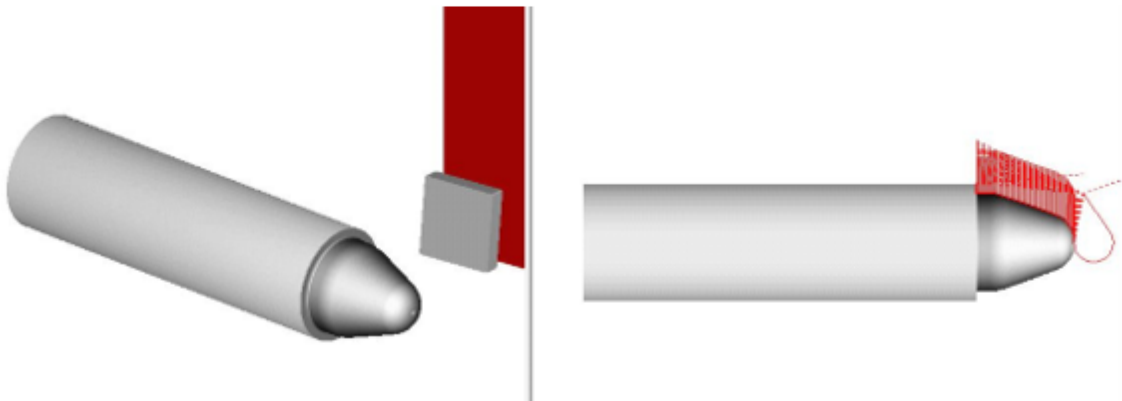


Ilustración 3.6 Generación punta cónica 3

- **PUNZONES OVOIDE:**

La geometría de los punzones con forma de ovoide la determinan dos circunferencias de un determinado diámetro, la primera determinará el radio de la herramienta y la segunda el radio de punta de la herramienta, ambas separados sus centros por una determinada distancia que será la que establezca la distancia de la punta.

Como en el caso anterior empezaremos analizando la geometría para poder determinar las coordenadas X1 y Z1, como ejemplo tomaremos la ovoide de radio 2 mm:

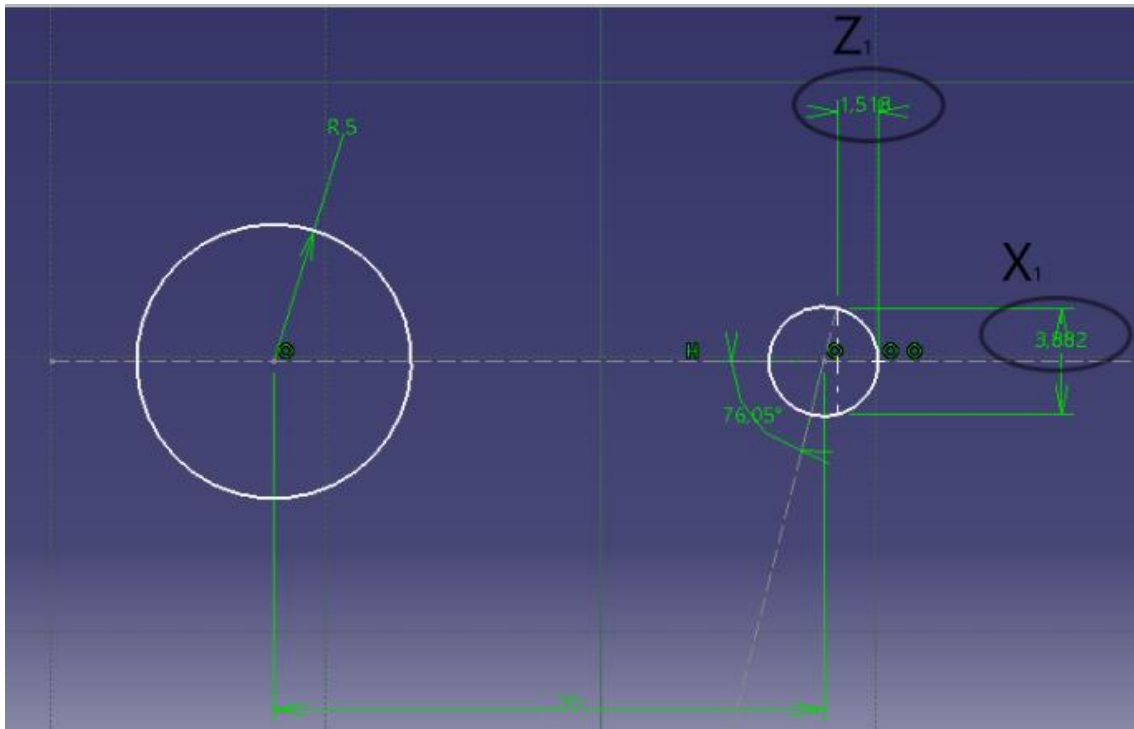


Ilustración 3.7 Geometría de la punta ovoide

La circunferencia que marca el radio de punta viene determinada por el centro de otra circunferencia mucho mayor que este caso fijamos un radio de 85 mm. Uniendo ambos centros de la circunferencia imaginaria (línea discontinua gris) y la de radio de punta mediante una línea, esta línea atravesara la circunferencia obteniendo un pequeño triángulo, mediante este triángulo y realizando trigonometría básica podremos obtener las fórmulas que nos dan las coordenadas X1 y Z1:

$$\alpha = \cos^{-1} \cdot \frac{20 \text{ (distancia entre centros)}}{83 \text{ (radio circunferencia)}}$$

$$X1 = \sin \alpha \cdot 2 \cdot 2$$

$$Z1 = 2 - (\cos \alpha \cdot 2)$$

Una vez determinadas las coordenadas iniciales del primer punto vamos a determinar de manera similar las coordenadas X2 y Z2, la coordenada X2 la determinara el radio de la punta:

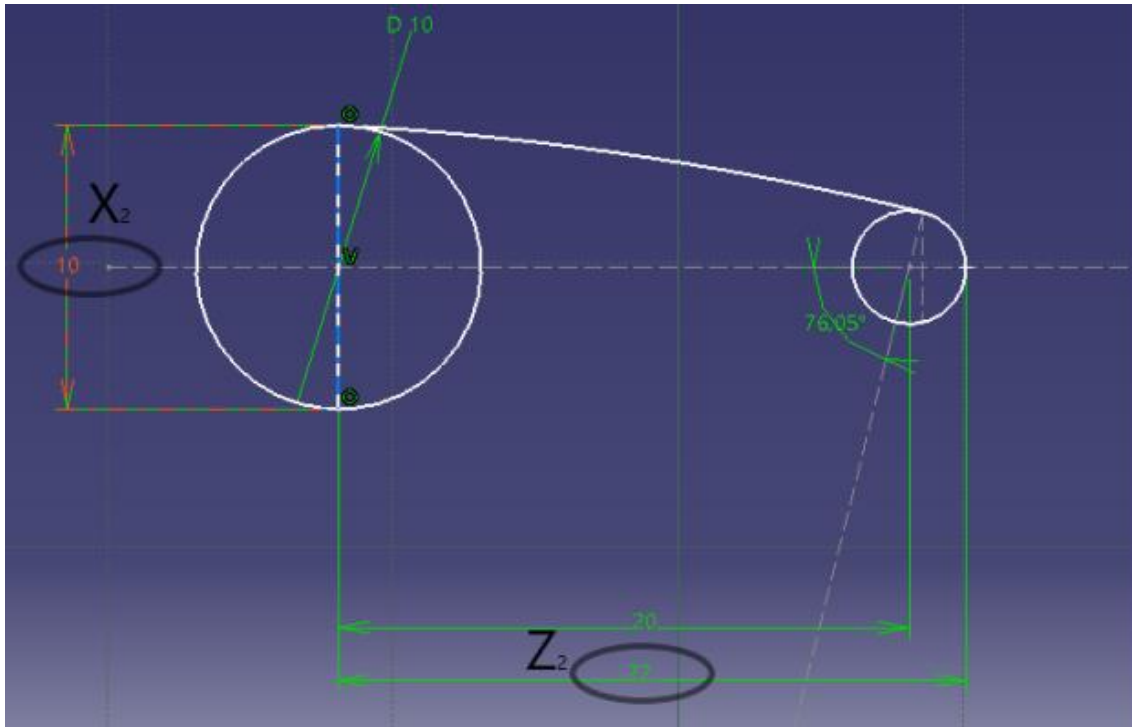


Ilustración 3.8 Coordenadas finales de la geometría ovoide

La coordenada Z2 es simplemente el radio de la circunferencia pequeña más la distancia entre centros, podemos establecer unas formulas generales para las demás puntas:

$$X2 = R(\text{radio de la herramienta}) \cdot 2$$

$$Z2 = Rp(\text{radio de punta}) + 20$$

Una vez se ha generado las formas que determinan la forma del ovoide se procede a generar el código ISO que fabricara las puntas con forma de ovoide:

Punzón ovoide radio punta 2mm (Ovoide 1)

```
N010 G54 X0 Z50
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X12 Z1
N050 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K4.5 P5=K0.2 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K0
P13=K100 P14=K120
N060 G00 X12 Z1
N070 G01 G37 R2 X0 Z0
N100 G03 X3.8820 Z-1.5178 R2
N110 G03 X10 Z-22 R85
N120 G01 X12 Z-22
N130 G00 X14 Z50
N140 M30
```

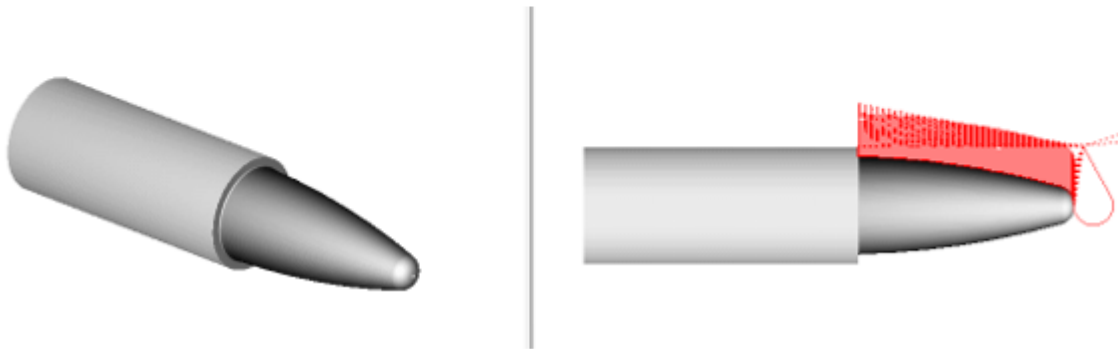


Ilustración 3.9 Generación punta ovoide 1

Punzón ovoide radio punta 3mm (Ovoide 2)

```

N010 G54 X0 Z50
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X12 Z1
N050 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K4.5 P5=K0.2 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K0
P13=K100 P14=K120
N060 G00 X12 Z1
N070 G01 G37 R2 X0 Z0
N100 G03 X5.8186 Z-1.2682 R3
N110 G03 X10 Z-23 R85
N120 G01 X12 Z-23
N130 G00 X14 Z50
N140 M30

```

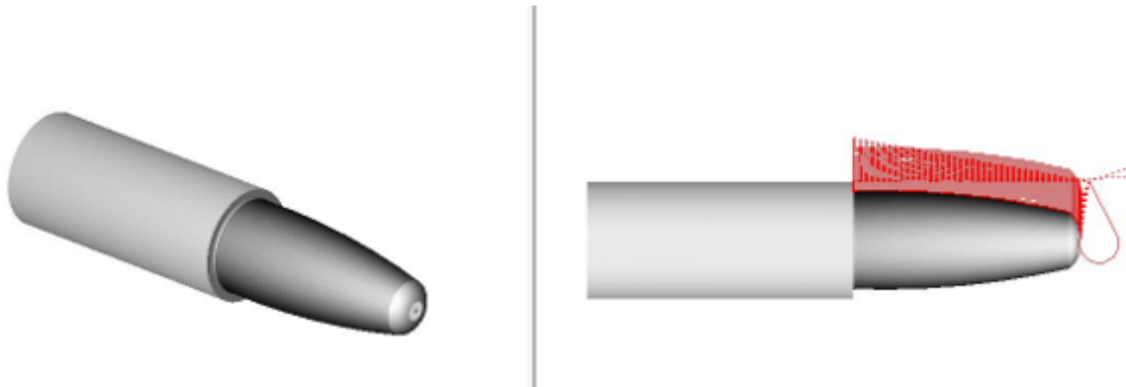


Ilustración 3.10 Generación punta ovoide 2

- **PUNZONES ESFÉRICOS:**

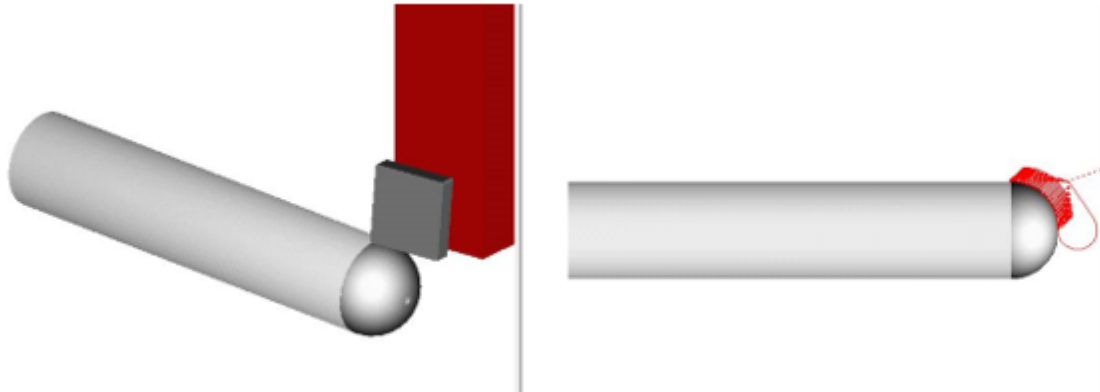
Para la generación del código de las puntas esféricas no es necesario ningún croquis de diseño pues que la geometría que siguen es una esfera simple por tanto las coordenadas X y Z las marcara el radio de punta o de circunferencia que nosotros deseemos. De la misma manera se ha procedido a generar el código ISO de las tres puntas esféricas:

Punzón esférico radio punta 5mm (Esférico 1)

```

N010 G54 X0 Z50
N020 G54
N030 G95 F0.04 S1000 T1.1 M4
N040 G0 X10 Z1
N050 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K1.5 P5=K0.1 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K45
P13=K100 P14=K100
N060 G00 X10 Z1
N070 G01 G37 R2 X0 Z0
N080 G03 X10 Z-5 R5
N090 M30
N100 G03 X10 Z-5 R5

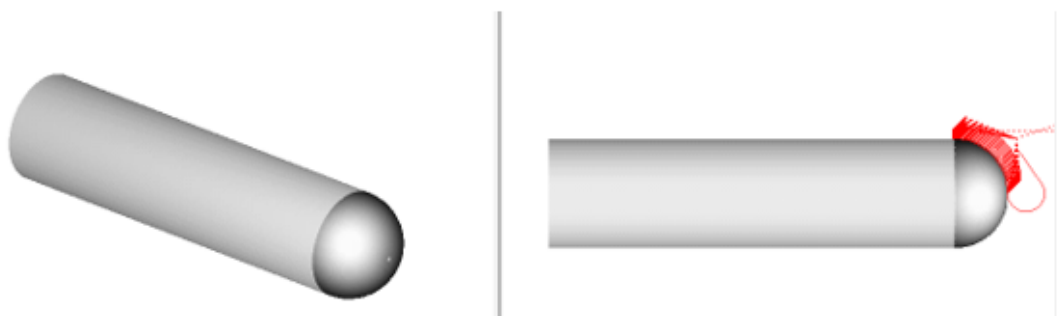
```

*Ilustración 3.11 Generación punta esférica 1***Punzón esférico radio punta 6mm (Esférico 2)**

```

N010 G90 G95 G96 F0.1 S100 T3.3 M4
N020 G92 S1500
N030 G54 X0 Z50
N031 G54
N040 G0 X12 Z1
N050 G66 P0=K0 P1=K0 P4=K1.5 P5=K0.1 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K45
P13=K80 P14=K85
N060 G00 X10 Z1
N070 G01 G37 R2 X0 Z0
N080 G03 X12 Z-6 R6
N085 G01 X14 Z-6
N089 G00 X12 Z50
N090 M30

```

*Ilustración 3.12 Generación punta esférica 2*

Punzón esférico radio punta 4mm (Esférico 3)

```

N010 G90 G95 G96 F0.1 S100 T3.3 M4
N020 G92 S1500
N030 G54 X0 Z50
N031 G54
N040 G0 X12 Z1
N050 G66 P0=K0 P1=K-1 P4=K1.5 P5=K0.1 P7=K0.1 P8=K0.1 P9=K0 P12=K45
P13=K80 P14=K85
N060 G00 X12 Z10
N070 G01 G37 R2 X0 Z-1
N080 G03 X8 Z-5 R4
N085 G01 X14 Z-5
N089 G00 X14 Z50
N090 M30

```

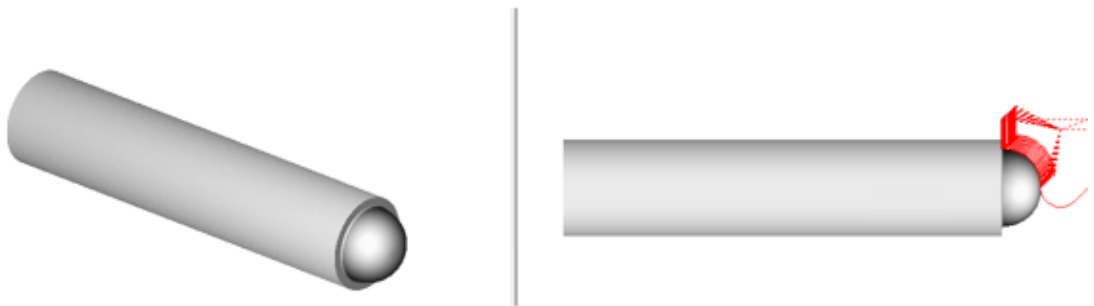


Ilustración 3.13 Generación punta esférica 3

Se puede observar que en todos los códigos ISO generados se incluye una pasada de acabado con entrada tangencial, esto es debido a que al tratarse todas de punas con forma esférica debemos de entrar tangencialmente para evitar posibles rebabas y que el punzón mecanice el PVC en vez de deformarlo que es nuestro objetivo.

3.2.2. Generación código ISO para SPIF.

Como ya se ha mencionado anteriormente vamos a estudiar dos formas de tronco de cono, una en la cual el ángulo de pendiente es fijo y la otra en la cual este ángulo va cambiando a medida que desciende el tronco de cono (Frustrum).

A continuación, se explica cómo se ha realizado el código ISO para ambas trayectorias:

- **TRONCO DE CONO RECTO:**

Para elaborar la trayectoria que seguirá la fresa y que la geometría final sea un tronco de cono hemos elaborado una hoja de Excel la cual introduciendo las fórmulas pertinentes nos calcula el código de manera automática, esto nos facilita mucho el trabajo ya que una vez listo el código basta con copiarlo directamente al WinUnisoft.

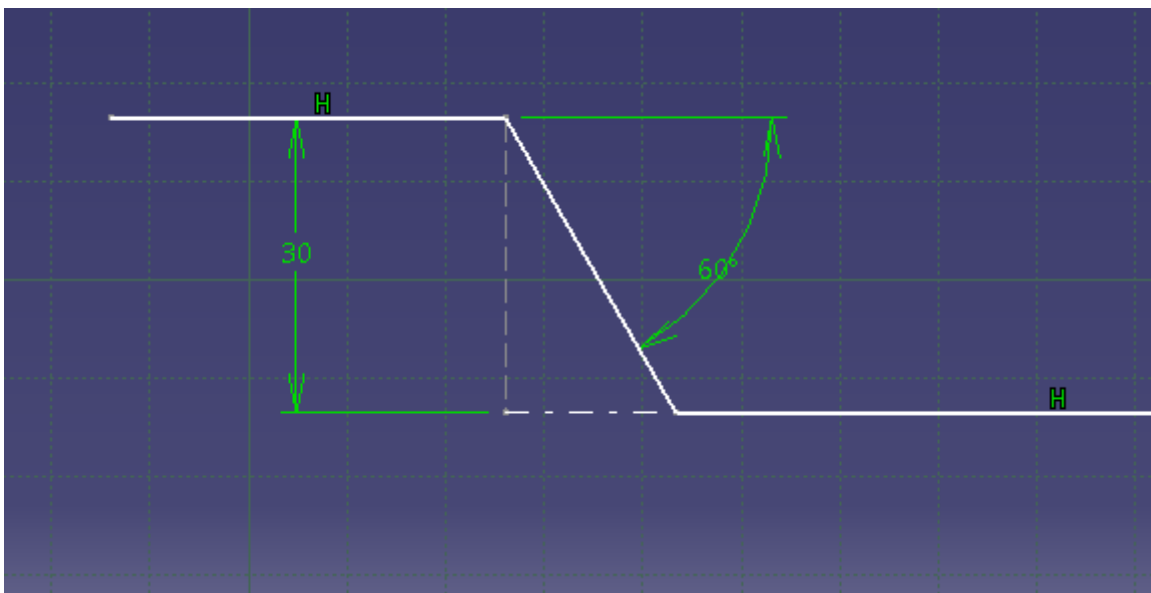


Ilustración 3.14 Geometría del tronco de cono recto.

Para generar esta trayectoria en una hoja Excel debemos de analizar la geometría, al tratarse de un cono recto podemos dibujar un triángulo imaginario y así poder aplicar trigonometría básica, así podemos establecer la siguiente formula:

$$X1 = X - \tan 60 \cdot Z$$

$$Z1 = Z + 0.5$$

Siendo X1 la coordenada x que indicara la siguiente circunferencia a la fresa y z1 la siguiente circunferencia, además X es la coordenada anterior o partiendo del radio de la circunferencia inicial y Z la coordenada anterior o partiendo desde la base o cero.

Una vez se ha determinado las fórmulas de la geometría se elabora una hoja Excel, la cual nos da el código ISO de la geometría completa y además nos proporciona una gráfica en la que podemos observar la forma final de la geometría.

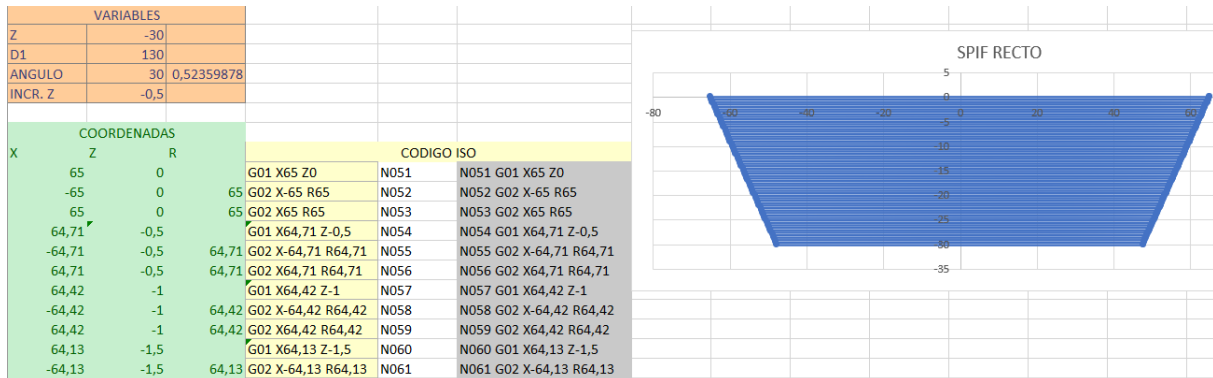


Ilustración 3.15 Hoja Excel del cono recto.

• **TRONCO DE CONO VARIABLE O FRUSTRUM:**

Para elaborar el código de esta geometría se ha elaborado una hoja Excel similar a la anterior, con la diferencia de que la geometría a analizar es más compleja al tratarse de un ángulo que no es fijo.

Para comprender la geometría frustrum mejor se adjunta una imagen que facilita mucho a la hora de elaborar las fórmulas:

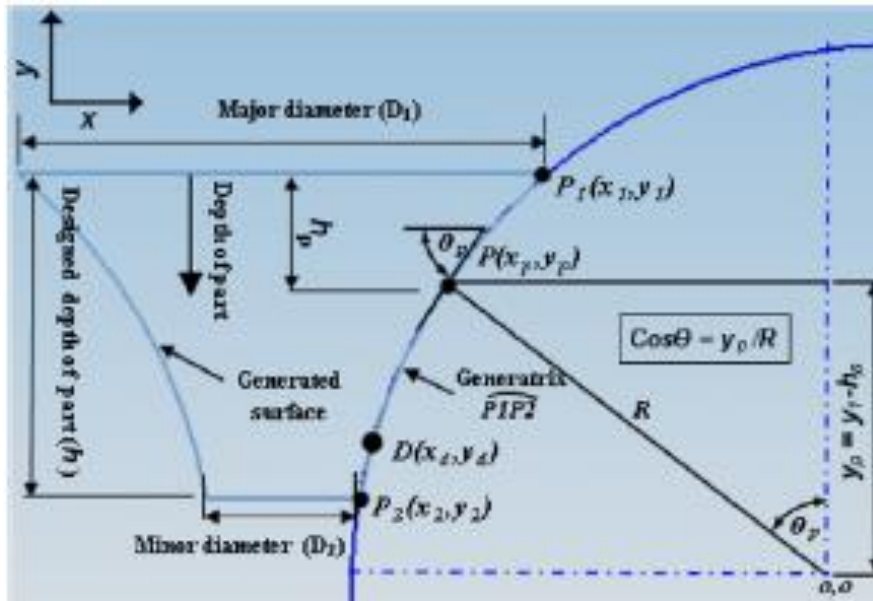


Ilustración 3.16 Geometría Frustrum

$$\theta_p = \cos^{-1}\left(\frac{y_p}{R}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{y_1 - h_p}{R}\right),$$

Ilustración 3.17 Ángulo variable del Frustrum

Esta foto sacada del artículo Hussain G., Gao L., Quijian L. (2007) [3] nos explica como determinar el ángulo en cada punto de esta geometría y una vez que tenemos el ángulo de cada circunferencia que vamos a realizar podremos sacar las coordenadas en cada vuelta de tal forma que:

$$\alpha_1 = \cos^{-1}\frac{Z}{R} + \alpha$$

Donde alfa 1 es el ángulo que queremos conocer, alfa es el ángulo de la vuelta anterior y Z y R son constantes que para nuestro ensayo valdrán Z=0.5 y R=50.

Una vez hemos determinado el ángulo al que queremos que este la siguiente circunferencia y ángulo de la anterior, aplicando trigonometría podremos sacar la nueva coordenada X, esta se obtiene restando la diferencia entre los dos catetos opuestos de la vuelta anterior y la siguiente.

En nuestra geometría el ángulo inicial del que partimos es 20° y el ángulo final es 70°:

$$X1 = 50 + R \cdot (\sin \alpha1 - \sin \alpha)$$

$$Z1 = Z + 0.5$$

Una vez que hemos determinado las fórmulas que gobiernan la geometría del frustrum realizaremos una hoja de cálculo similar a la anterior de la que obtendremos el código ISO:

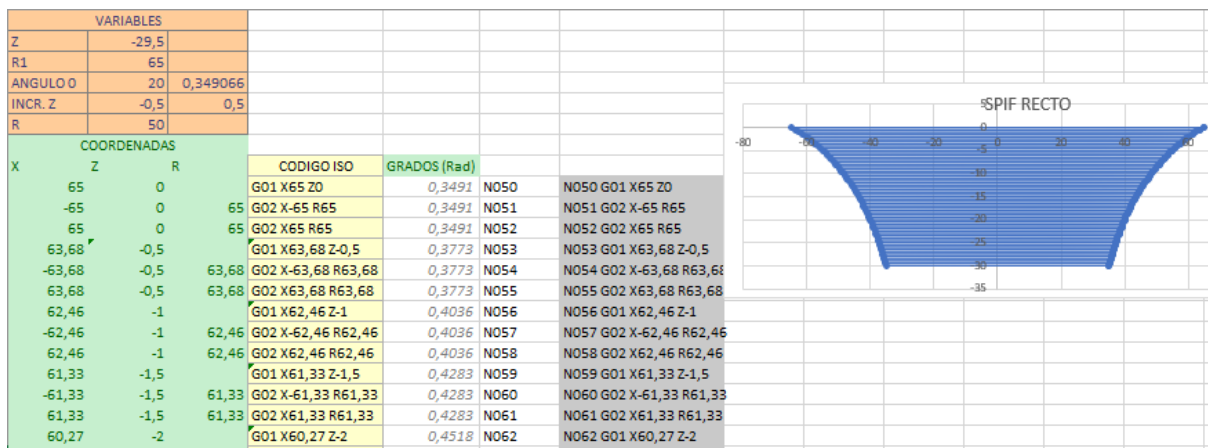


Ilustración 3.18 Hoja Excel Frustrum

3.3. Simulación del código ISO.

Una vez elaborados los códigos el siguiente paso para realizar nuestro ensayo sería la simulación de los mismos y verificar que están libres de errores. Para ello usaremos dos herramientas, una será la comprobación en el software WinUnisoft y la otra la comprobación en la misma fresadora, ya que esta dispone de una herramienta la cual te traza el recorrido sin mover la fresa y te lo muestra en una pantalla.

Para realizar la simulación en el software simplemente definiremos un tocho aleatorio con medidas correspondientes y realizaremos la simulación:

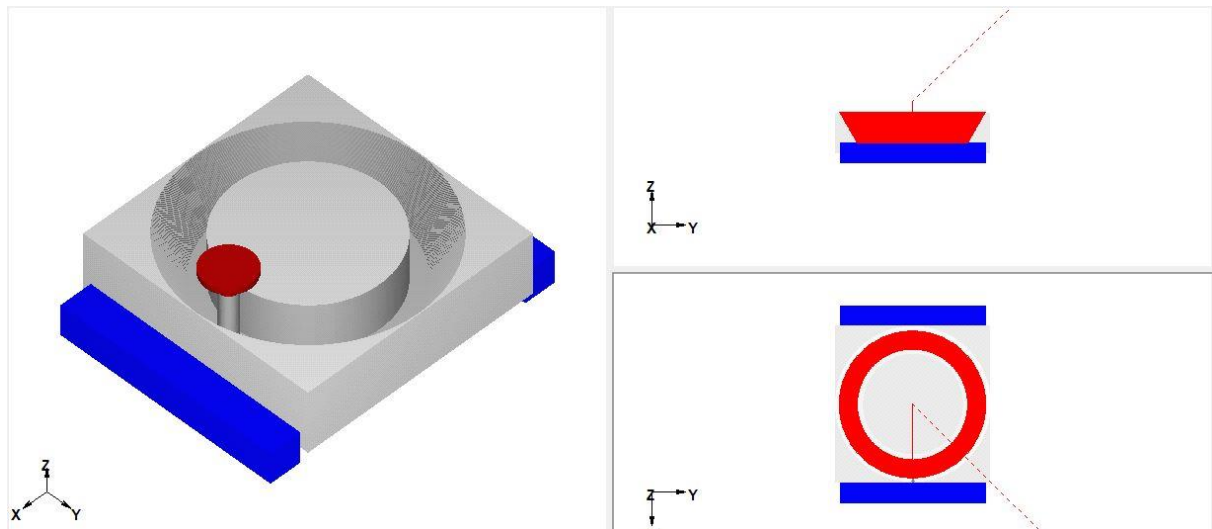


Ilustración 3.19 Simulación de la trayectoria recta

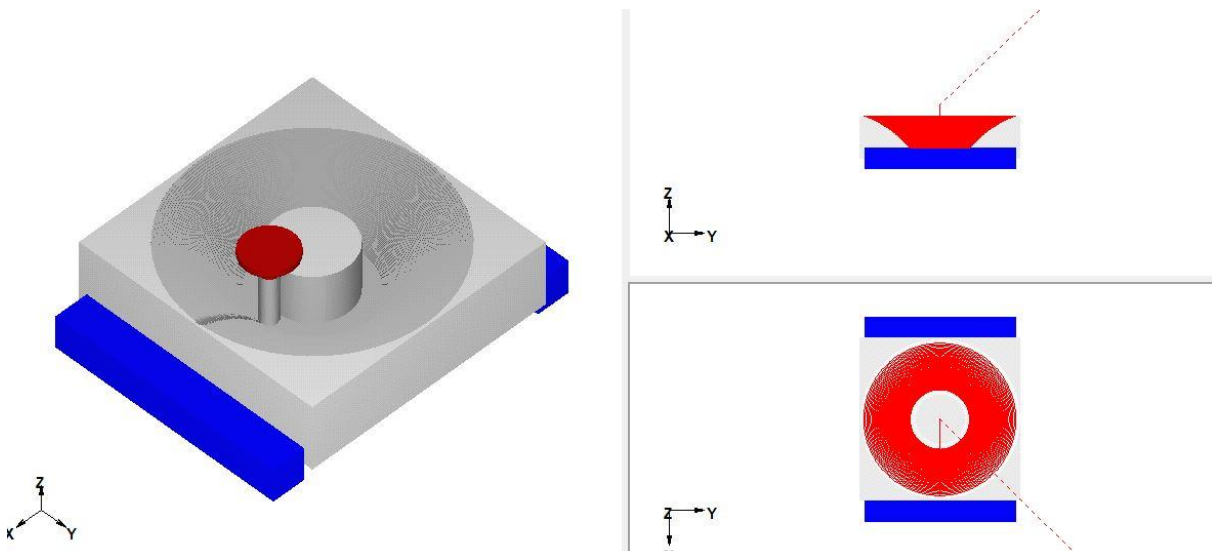


Ilustración 3.20 Simulación de la trayectoria Frustrum

Para la simulación en la fresadora simplemente copiamos el código obtenido en una memoria de datos y mediante el PC del taller mandaremos el código a la fresa, guardándolo para ejecutarlo posteriormente varias veces.

3.4. Fabricación de los punzones.

El siguiente paso para realizar nuestros ensayos será la elaboración de las distintas puntas que vamos a estudiar cómo se ha mencionado antes tendremos que fabricar dos puntas ovoides, tres esféricas y otras tres cónicas.

Simplemente se siguen los pasos similares la fresa, pero esta vez usaremos el torno CNC, pasamos los códigos de las distintas formas mediante el cable de datos y las guardamos en la memoria del torno, en este caso la simulación se realiza en vacío ya que no dispone de la opción de simular.

Se cortan los distintos tochos cilíndricos y se colocan en el torno y se ejecuta el código de cada punta, obteniendo así las diferentes formas que vamos a estudiar:



Ilustración 3.21 Fabricación de las puntas en torno CNC



Ilustración 3.22 Diferentes puntas fabricadas para los ensayos

Como se puede observar en la Ilustración 3.22 se han fabricado las puntas que se han mencionado antes y a continuación están listas para realizar los ensayos necesarios.

3.5. Realización de los ensayos.

Para realizar los ensayos siempre vamos a seguir la misma metodología, primero se cortarán las placas de PVC, se preparará la fresadora y se realizará el ensayo.

Se van a realizar un total de 16 ensayos, inicialmente se iba a realizar 12 ensayos, pero por problemas que se explicaran posteriormente se tuvieron que realizar más. Con cada punta se van a ensayar dos placas de PVC una con el cono recto y otra con el frustrum.

3.5.1. Preparación de las placas.

El primer paso para la realización de los ensayos es la fabricación de las placas de PVC con las medidas descritas en apartados anteriores, ya que el PVC que se dispone en el laboratorio viene cortado en planchas de 1x1 m y debemos de dividir las en placas de 200x200 mm.

Para ello se va a utilizar una sierra de calar eléctrica que se encuentra en el taller de la EPS. Se mide la placa con las medidas correspondientes, se trazan las líneas para guiar la sierra y se cortan por dicha línea.

Una vez cortadas se le limpian los filos ya que quedan llenas de rebabas, y se retira el plástico que lleva y que quita la parte de las líneas que hemos pintado.

Una vez se ha hecho todo esto la placa queda preparada para realizar el ensayo.

3.5.2. Preparación de la fresadora.

El siguiente paso se trata de preparar la fresadora para la realización de los ensayos, en primer lugar, como ya se ha mencionado antes, introduciremos el código que vamos a ejecutar en la memoria de la fresa.

A continuación, se colocará el soporte de sujeción junto con la mesa dinamométrica, esta debe tararse al inicio de cada ensayo de manera que al apretar los tornillos del soporte o colocar el soporte habrá que pulsar el botón de medición.

Para la recogida de datos debemos de iniciarla mediante el botón play que se muestra en el PC donde va conectada la mesa.

Una vez realizado todo esto debemos buscar el cero máquina, para ello en la pantalla de la fresadora elegiremos el modo manual y dentro de este modo le indicaremos que busque el cero en X, Y y Z, la maquina automáticamente se colocara en el cero,

A partir de ahí nosotros tenemos que buscar el cero pieza, es decir, el cero con el que nosotros vamos a trabajar, para ello pondremos la fresa en modo manual y moveremos el carro mediante los volantes de cada eje correspondiente.

Colocaremos la herramienta en el centro y nos desplazaremos en cualquiera de los ejes X e Y hacia el extremo de la circunferencia de la base del soporte. Una vez toque el extremo, que vendrá indicado mediante la mesa dinamométrica, se le indicará a la fresa el cero, llevando el carro hacia el otro extremo sabremos lo que tiene de diámetro, al dividirlo por dos nos dará el centro de la circunferencia en ese eje que será nuestro cero.

Este proceso se realiza al igual para el otro eje horizontal, y para hacer el eje vertical pondremos la placa, tararemos la mesa y realizaremos el mismo proceso.

Una vez realizado el cero, el programa está listo para ejecutarse, pondremos aceite en la base de la placa mediante una aceitera y taramos la mesa dinamométrica ya tenemos la fresa lista para realizar el ensayo.

3.5.3. Ejecución del ensayo.

Una vez hemos realizado todos los pasos anteriores todo está listo para realizar los ensayos, simplemente seguimos el mismo proceso una y otra vez hasta que ensayemos todas las puntas con las dos trayectorias programadas. La metodología que se sigue para la ejecución de los ensayos es la siguiente:

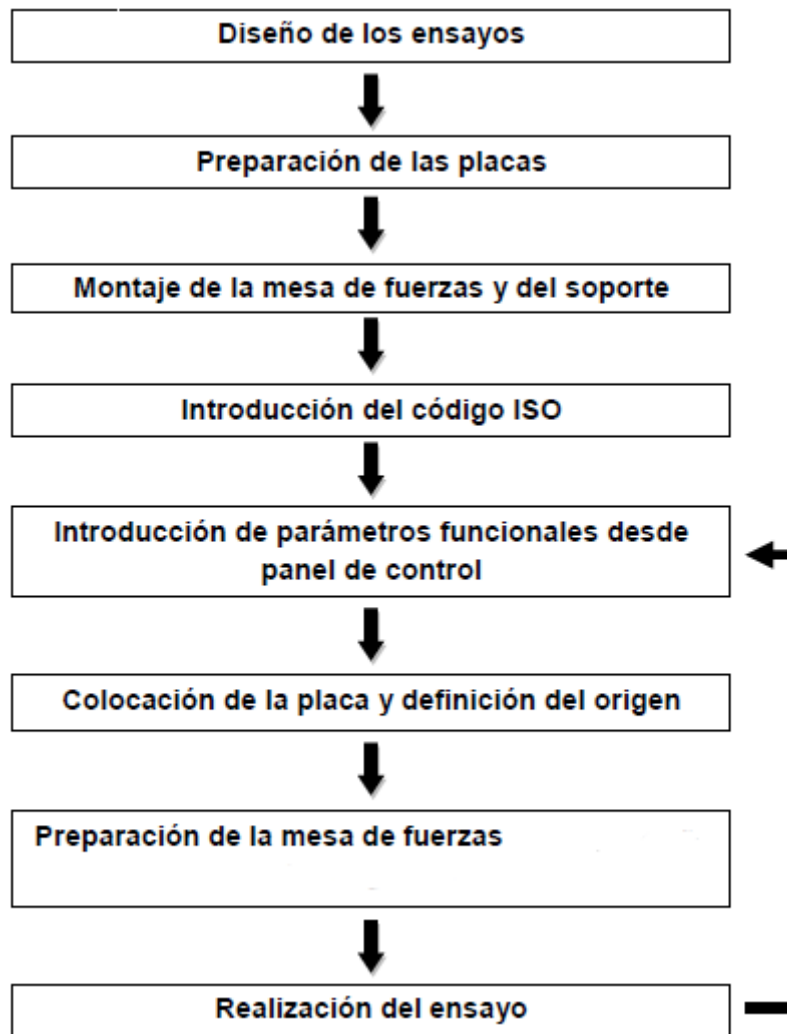


Ilustración 3.23 Metodología para la realización de los ensayos

En las siguientes ilustraciones se pueden observar algunos de los resultados obtenidos en los ensayos, la ejecución de los mismos y las diferentes geometrías realizadas:



Ilustración 3.24 Realización de un frustrum con la punta esférica



Ilustración 3.25 Realización de un cono con la punta cónica

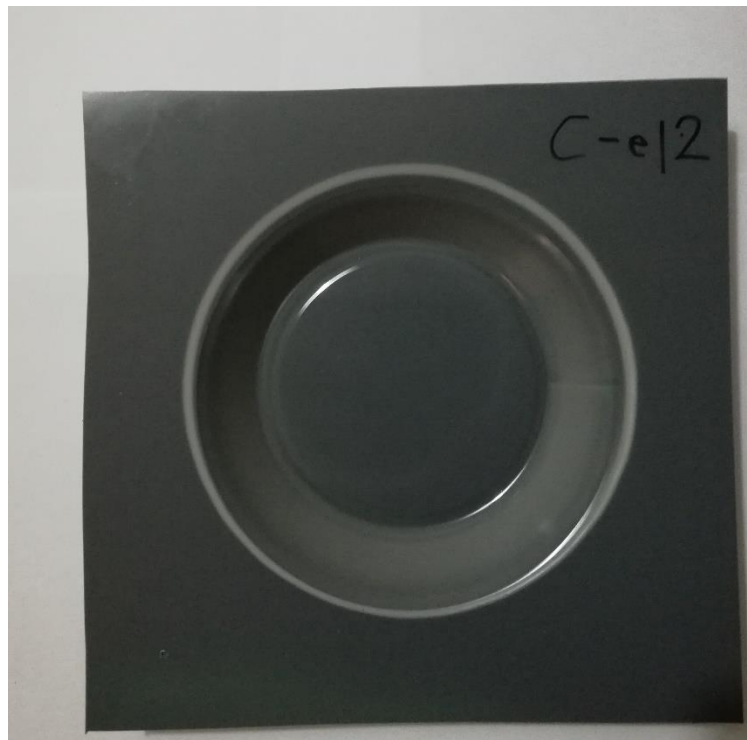


Ilustración 3.26 Geometría de un cono recto obtenida con la punta esférica
12



Ilustración 3.27 Geometría de un frustrum obtenida con la punta esférica
12

3.5.4. Medidas de fuerzas.

Mediante la mesa dinamométrica a la misma vez que estamos realizando el ensayo, el osciloscopio junto con la memoria de datos recogen los datos de fuerza cada 0.05 segundos que previamente se ha configurado.

Estas fuerzas son tratadas por una parte del osciloscopio devolviendo una señal más “limpia” y poder tratarla a posteriori.

Los datos que te devuelve la mesa dinamométrica son:

- La fuerza vertical o la correspondiente al eje Z de la fresadora, esta dará valores siempre positivos ya que es la fuerza que realiza la placa de PVC sobre el punzón.

- Las fuerzas horizontales correspondientes a los ejes X e Y de la fresadora, estos valores oscilarán entre fuerzas positivas y negativas correspondientes a los valores en los extremos de estos ejes, son valores de fuerza máximos y mínimos en estos ejes.

Una vez hemos recogido los datos de fuerza que nos ha devuelto en un archivo de texto estos deben ser tratados en dos fases, la primera fase la dedicaremos a limpiar los datos erróneos o nulos ya que una vez se pulsa la tecla de recogida de datos tardaremos un tiempo en ejecutar el programa y viceversa al terminar la ejecución, la segunda fase la dedicaremos al tratamiento de estos datos en si para poder observar y comparar resultados del ensayo ya que los datos que nos ofrece la mesa contienen mucho ruido y estos han de ser tratados.

Para la primera fase simplemente en el mismo archivo de texto se modifican o se eliminan los valores que marquen para un tiempo determinado una fuerza en los ejes de cero, el primer valor que empiece a marcar una fuerza por mínima que sea en cualquiera de los 3 ejes se considerará nuestro tiempo 0 y por tanto en la columna de tiempo le indicaremos cero, a partir de ahí se le va sumando a cada dato 0.05 segundos.

Una vez se ha realizado esto representamos en una gráfica los valores de la fuerza vertical con respecto al tiempo, quedando una gráfica similar a la siguiente:

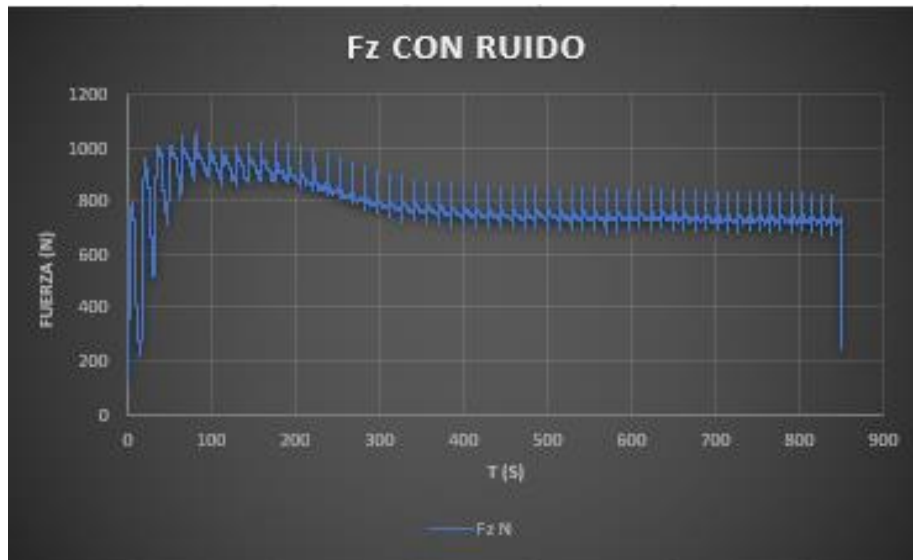


Ilustración 3.28 Gráfica de medida de fuerza en eje Z

En la Ilustración 3.28 se puede observar un ejemplo de los datos que tenemos tratados en la primera parte, representando valores de fuerza verticales en función del tiempo. Se pueden observar valores máximos y mínimos de fuerza en cada oscilación, es por eso que estos deben representarse con una línea media para poder obtener conclusiones y realizar comparaciones con los demás ensayos.

La fase dos de tratamiento de datos se explicará posteriormente.

3.5.5. Medidas de rugosidad.

La medida de rugosidad, con la cual vamos a comparar el acabado superficial de cada punta, la vamos a realizar en el post-procesado, es decir, se realizarán después de los ensayos. Para ello es necesario realizar un pequeño montaje como se puede observar en la Ilustración 2.24. una vez se han anotado todos los datos de rugosidad simplemente con la ayuda de cualquier programa vamos a realizar una tabla comparativa de rugosidades para poder sacar conclusiones.

3.5.6. Incidencias durante los ensayos.

Durante la realización de los ensayos han ocurrido varios problemas que se van a comentar aquí además de las soluciones que se han tomado para poder resolverlos, así como las primeras conclusiones sobre el estudio que aparecieron a simple vista.

Dentro de los ensayos ocurrieron varios problemas que se resolvieron fácilmente como por ejemplo se rompió el torno y tuvimos que esperar que el técnico lo arreglara, se perdía la tarjeta de adquisición de datos, etc. Pero estos problemas no tienen importancia ninguna ya que la solución es fácil.

Los problemas que ocurrieron con más importancia y gravedad en nuestros ensayos fueron dos, uno en la parte de medida de fuerzas y otro en la parte de post-procesado, en la medida de rugosidad, el cual repercutió sobre la primera parte.

La primera incidencia que ocurrió fue en la medida de fuerzas, durante la realización de los ensayos primero se probaron las puntas esféricas, que fueron dos la de 10 y 12 mm, no hubo ningún problema ya que estos ensayos ya se habían realizado antes en otros estudios de la Universidad de Jaén.

Cuando se realizaron los ensayos con las puntas cónicas de 1 y 2 mm de radio de punta y con la punta con forma de ovoide con 2 mm de radio de punta se observó lo siguiente en los ensayos:



Ilustración 3.29 Resultado ensayo con punta cónica radio 1 mm



Ilustración 3.30 Resultado ensayo punta ovoide radio 2 mm

Estos fueron los ensayos de las puntas más pronunciadas que se fabricaron, algo similar pasó con las puntas cónicas tanto de radio 1 y 2 mm y con la punta de ovoide radio 2 mm todas las placas resultaron así.

Tras esto se concluyó que tanto para el ensayo del cono recto como para el frustrum el radio de punta es determinante en el acabado superficial ya que al ser tan pronunciada la punta lo que ocurre al realizar el SPIF es que desplaza la misma cantidad de material tanto para un extremo de la punta como para el otro. Se puede observar que es como se abriera un surco en la placa, desplazando material a ambos lados:



Ilustración 3.31 Realización del ensayo con punta cónica

Por tanto, la primera conclusión de nuestro estudio es que para realizar geometrías de SPIF curvo no se puede escoger una punta con un radio de punta menor que 3 mm ya que el acabado lógicamente no es el deseado.

Sin embargo, para la geometría cónica y en el ensayo de la punta cónica de radio 2 mm resultó exitoso mientras que para el frustrum ocurrió lo mismo que en casos anteriores, se ha supuesto que esto tiene que ver con la geometría de la punta y del cono ya que al ser la punta cónica y la geometría que se está realizando también es cónica no deja desplazar material hacia un extremo por tanto la placa la realiza bien:



Ilustración 3.32 Resultado ensayo punta cónica radio 2 mm

Sería una buena opción de estudio para trabajos futuros. Además, se probó a realizar un nuevo código que marcara la trayectoria pero que los incrementos de bajada fuesen de 0.3 mm, pero tampoco fue exitoso.

Para solucionar el problema de los ensayos anteriores lo que se realizó es un nuevo punzón el cual contiene una punta cónica y en el otro extremo una con forma de ovoide ambos con radio de punta 3 mm:



Ilustración 3.33 Punta nueva fabricada

El otro problema que tuvimos en los ensayos que repercutió en el diseño de los mismos fue con la esfera de radio 8 mm ya que esta punta se realizó refinando un punzón ya existente en el laboratorio y era de 10 mm por tanto quedó un escalón en la punta que afectó a nuestros ensayos.

Al principio no se podía apreciar o se creía característico de esta punta, pero cuando medimos la rugosidad del ensayo y se realizó los cálculos pertinentes se descubrió que mientras que todos los ensayos salían del orden de 0.5 micrómetros, este ensayo daba como resultado del orden de 16 micrómetros.

La solución a esto fue realizar un desbaste en la punta para que el escalón se retirase y no afectara al ensayo:

*Ilustración 3.34 Restauración de la punta esférica de 8 mm*

Con esta punta se volvió a realizar los dos ensayos y dieron resultados coherentes.

Lógicamente los datos de los ensayos que han salido defectuosos no se han tratado por que esas puntas se han descartado directamente. Nuestro estudio se centra ahora en el análisis de fuerzas y rugosidad de las tres puntas esféricas, una ovoide y otra cónica.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVAS.

En este apartado se van a comentar todos los resultados que se han obtenido en los ensayos, se analizarán en dos categorías, medidas de fuerza y medidas de rugosidad tanto para la geometría frustrum como para la geometría recta.

Este apartado forma parte de la segunda etapa de tratamiento de datos mencionada anteriormente. Para tratar estos datos y eliminar el ruido que se muestra en la Ilustración 3.28 se ha elaborado una hoja de cálculo la cual nos facilita mucho el trabajo.

En primer lugar, se ha dado como resultado fuerzas verticales correspondientes al eje Z y fuerzas horizontales cuyos componentes son el eje X e Y. Una vez tenemos los resultados expresados en horizontal y vertical solo queda realizar la media de las oscilaciones para poder representarla. Para ello con la ayuda del perímetro y velocidad en cada vuelta previamente calculado se calcula también el tiempo teórico. Una vez tenemos el tiempo teórico con la ayuda de "BUSCARV" vamos a encontrar los valores de Z en el cual el tiempo teórico coincide con el experimental representando ese valor tendríamos el valor medio de cada vuelta y así podemos representar las fuerzas horizontal y vertical.

4.1. Resultados de las fuerzas para geometría con ángulo fijo.

En primer lugar, vamos a analizar las fuerzas en todos los ensayos cuya geometría realizada es la de un tronco de cono recto con una pendiente de 60° y un incremento de bajada de 0.5 mm.

- **Ensayo 1.1**

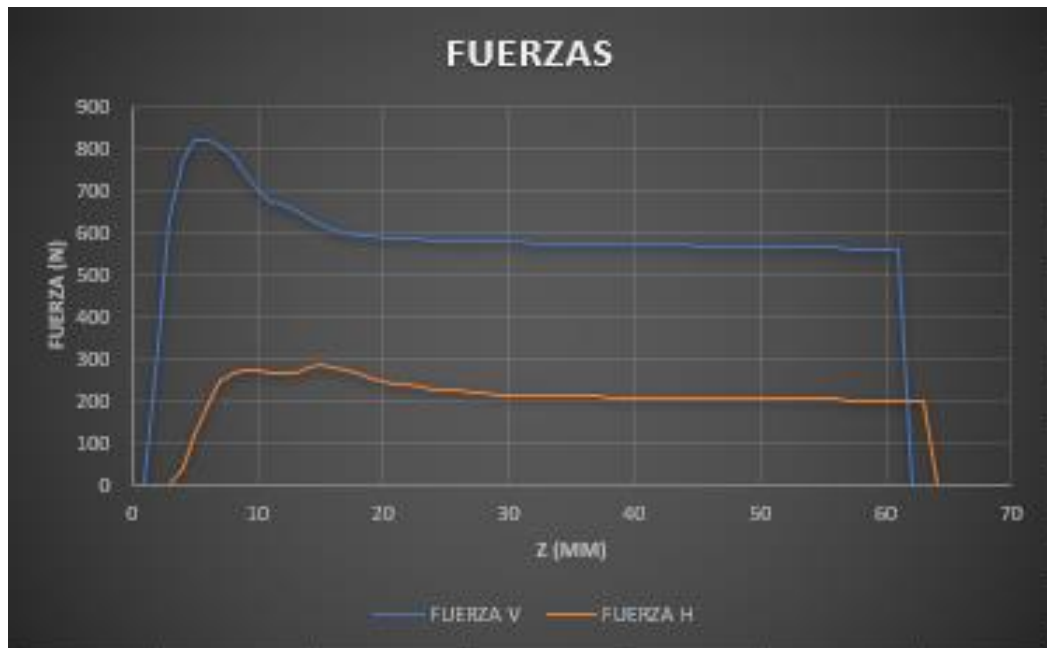


Ilustración 4.1 Fuerzas punta ovoide

- **Ensayo 1.2**

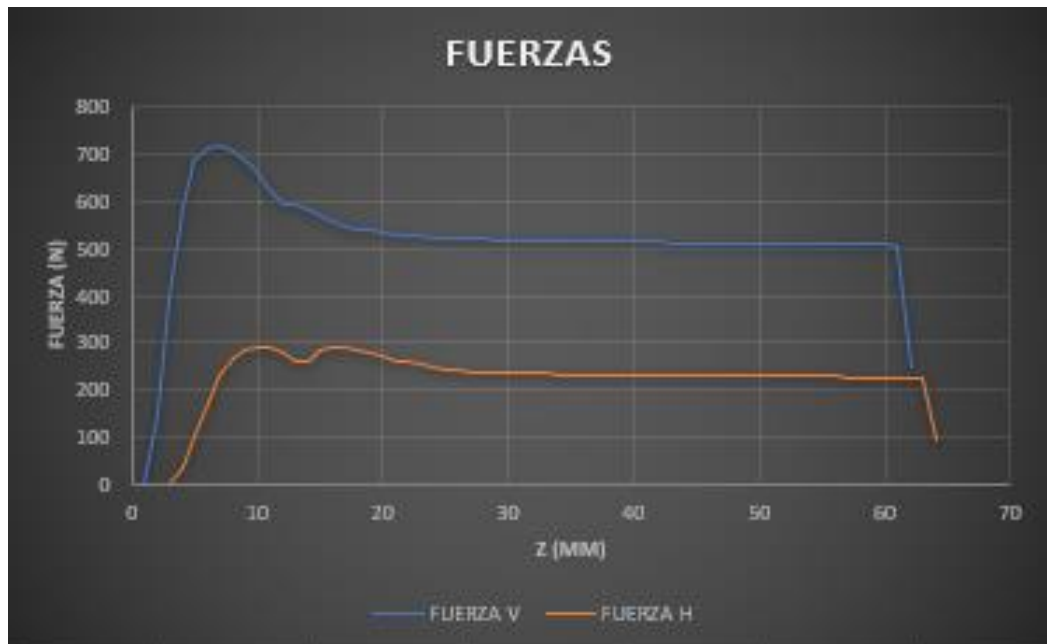


Ilustración 4.2 Fuerzas punta cónica

- **Ensayo 1.3**

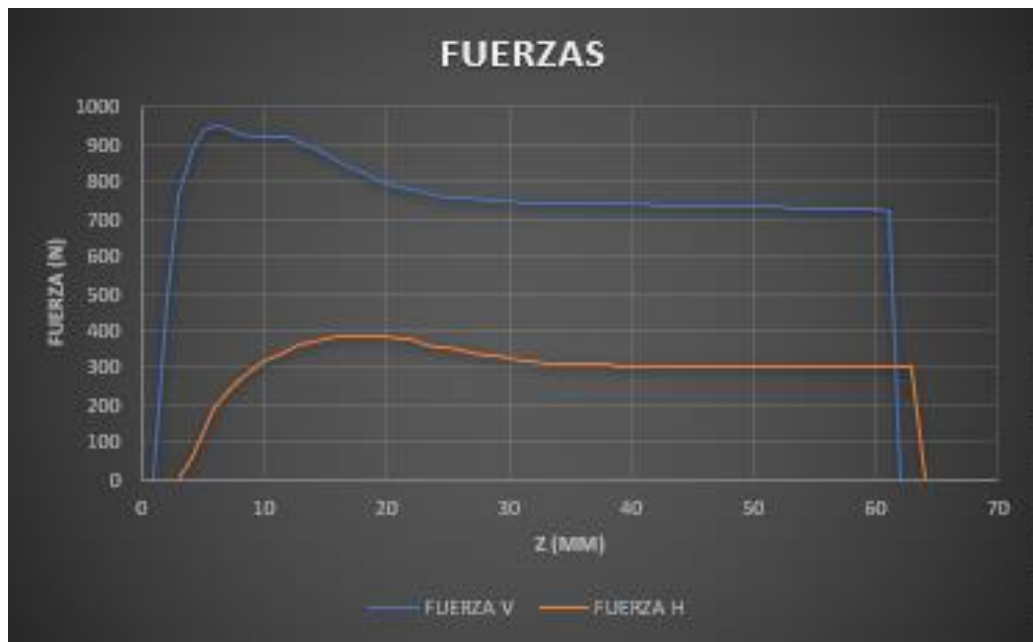


Ilustración 4.3 Fuerzas punta esférica 2

- **Ensayo 1.4**

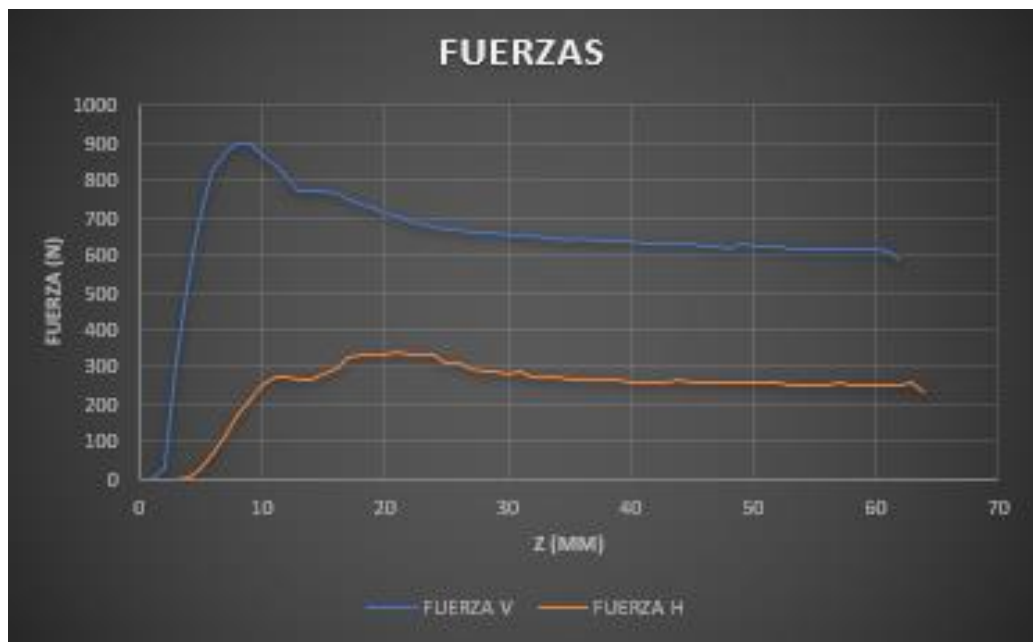


Ilustración 4.4 Fuerzas punta esférica 1

- **Ensayo 1.5**

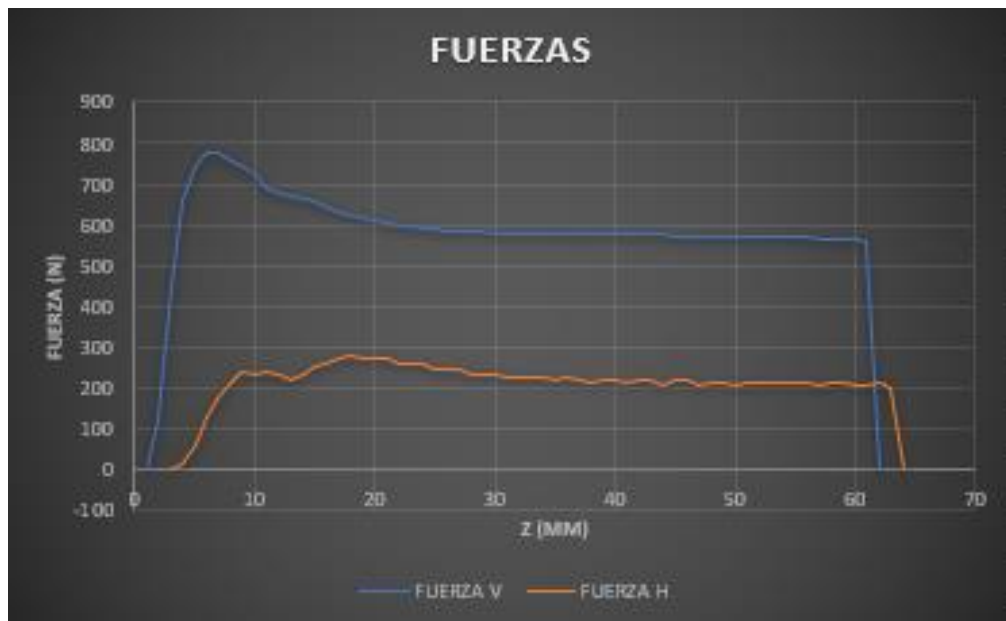


Ilustración 4.5 Fuerzas punta esférica 3

Como se puede observar en las ilustraciones anteriores si en primer lugar comparamos el grupo de las puntas esféricas, que son las puntas que se suelen usar en los ensayos, sobre todo la de 10 mm, podremos observar que con respecto al eje vertical la fuerza que mayor máximo tiene es la de 12 mm, en torno a unos 900 N y a medida que descende su radio de punta la fuerza descende su valor hasta el mínimo de 780 N que corresponde con la punta de 8 mm.

Si de la misma forma analizamos el eje horizontal ocurre algo similar el máximo estaría en torno a unos 400 N que corresponde con la punta de 12 mm y el mínimo estaría en torno a unos 290 N que corresponde con la punta de 8 mm.

Podemos concluir entonces que a medida que descende el diámetro de la punta descende así la fuerza, es lógico ya que la zona de contacto es menor.

Si comparamos ahora el grupo de las puntas esféricas con la punta ovoide se puede observar que la fuerza vertical en la punta ovoide tiene un mayor máximo que todas las puntas, en torno a unos 830 N, pero llega a estabilizar en torno a unos 600 N por debajo de la punta de 8 mm. Si comparamos de la misma manera la fuerza en el eje horizontal podemos ver que el máximo está en unos 300 N, pero se llega a estabilizar en unos 200 N menor fuerza que las esféricas.

Si de la misma manera comparamos con la punta cónica vemos que tiene un comportamiento similar a la punta con forma de ovoide solo que la fuerza vertical disminuye llegando a estabilizarse en torno a unos 500 N.

FORMA DE PUNTA	VALOR MÁXIMO		VALOR MÍNIMO		VALOR MEDIO	
	Eje H.	Eje V.	Eje H.	Eje V.	Eje H.	Eje V.
OVOIDE	300 N	820 N	200 N	550 N	200 N	580 N
CÓNICA	300 N	720 N	220 N	500 N	250 N	500 N
ESFÉRICA 12	400 N	930 N	300 N	710 N	300 N	710 N
ESFÉRICA 10	330 N	900 N	250 N	600 N	250 N	600 N
ESFÉRICA 8	280 N	780 N	200 N	580 N	200 N	580 N

Tabla 5 Valores de fuerzas en geometría cónica

Como se puede observar en la tabla es básicamente lo que se ha explicado anteriormente. Como conclusión para realizar una geometría cónica con un ángulo de pendiente constante la que mejor se comporta con respecto a fuerzas es la punta cónica, en segundo lugar, la punta esférica de 8 mm y en tercer lugar la ovoide siguiéndole a estas la punta de 10 mm y 12 mm.

4.2. Resultados de las fuerzas para geometría con ángulo variable.

A continuación, se muestran los resultados de fuerza para una geometría variable con un ángulo inicial de 20° y final de 70° y con un incremento de bajada de 0.5 mm.

- **Ensayo 1.6**



Ilustración 4.6 Fuerzas punta ovoide

- **Ensayo 1.7**

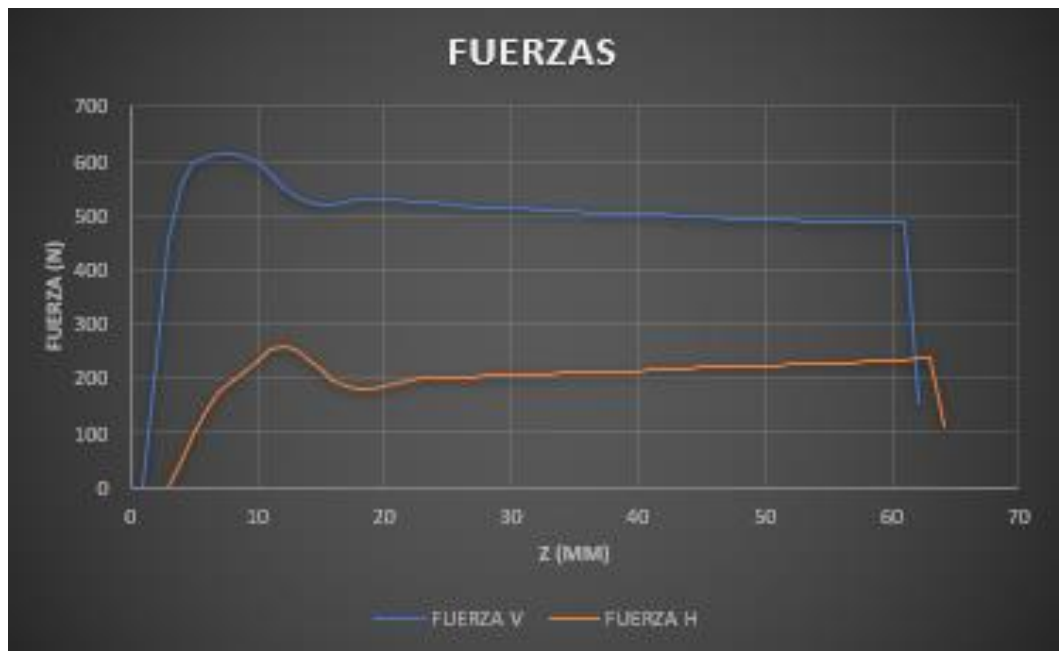


Ilustración 4.7 Fuerzas punta cónica

- **Ensayo 1.8**

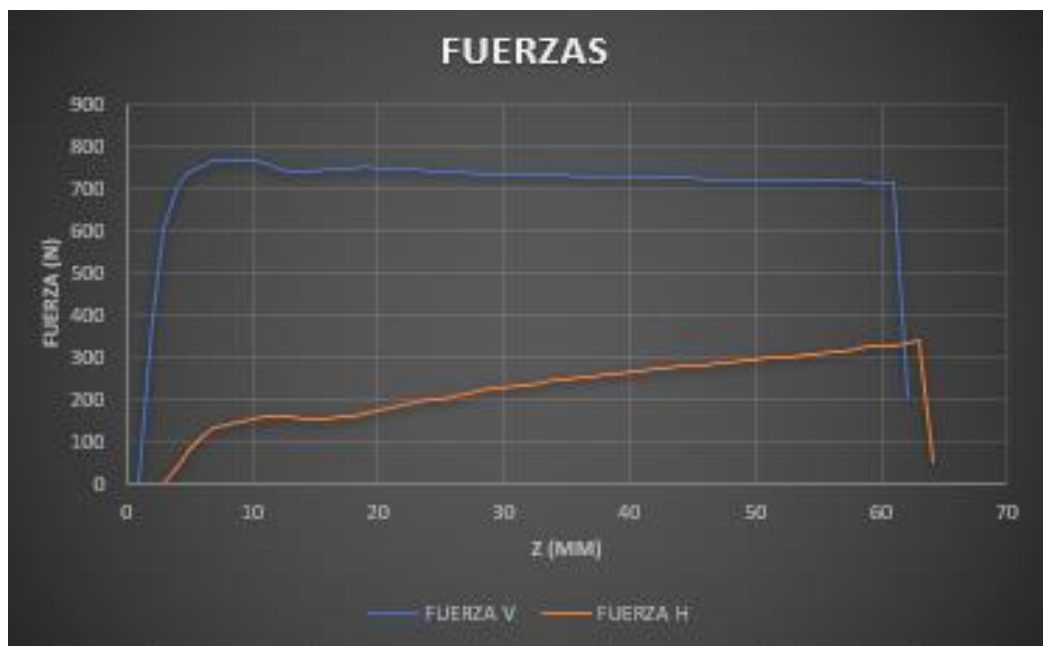


Ilustración 4.8 Fuerzas esférica 2

- **Ensayo 1.9**

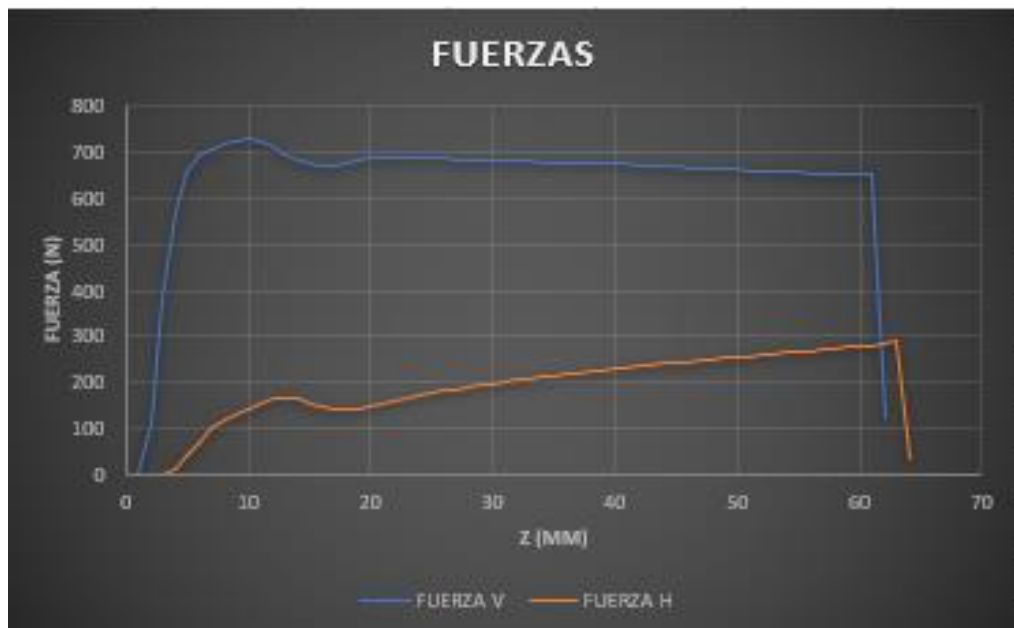


Ilustración 4.9 Fuerzas esférica 1

- **Ensayo 1.10**

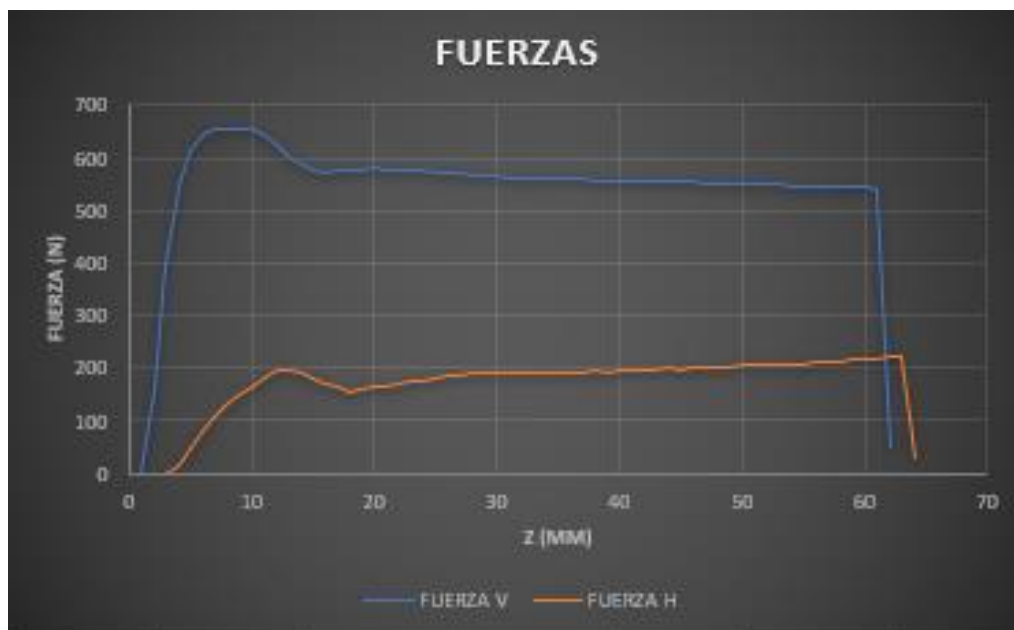


Ilustración 4.10 Fuerzas esférica 3

De nuevo, si comparamos el grupo de los punzones esféricos ocurre algo parecido a lo anterior, a medida que disminuimos el diámetro disminuye la fuerza del punzón. En este caso la fuerza no se estabiliza, si no que va de menor a mayor en pendiente esto es debido a que el ángulo de bajada no es el mismo siempre como en el caso anterior, se puede ver también que a medida que el ángulo aumenta la fuerza también ya que no es lo mismo trabajar en un plano de 20° que en uno de 70°.

Si observamos las fuerzas en la punta cónica o en la ovoide más o menos la fuerza si se mantiene constante debido a su forma peculiar, en este caso con la punta con forma de ovoide es con la que menos fuerza se realiza.

FORMA DE PUNTA	VALOR MÁXIMO		VALOR MÍNIMO		VALOR MEDIO	
	Eje H.	Eje V.	Eje H.	Eje V.	Eje H.	Eje V.
OVOIDE	210 N	720 N	150 N	520 N	200 N	520 N
CÓNICA	250 N	610 N	190 N	490 N	200 N	490 N
ESFÉRICA 12	310 N	750 N	100 N	720 N	200 N	720 N
ESFÉRICA 10	300 N	720 N	100 N	650 N	200 N	650 N
ESFÉRICA 8	210 N	650 N	200 N	550 N	200 N	550 N

Tabla 6 Valores de fuerzas en Frustrum

Observando la tabla podemos realizar conclusiones más acertadas, podemos ver que si queremos realizar una geometría con un ángulo variable la punta que mejor se comporta con respecto de fuerza es la punta cónica, en segundo lugar, la esférica de 8 mm, y las demás están muy igualadas, habría que observar las condiciones horizontales y verticales de la placa donde vamos a trabajar.

4.3. Resultados de rugosidad para geometría con ángulo fijo.

Para medir la rugosidad de cada ensayo se procede con el método que se ha explicado en el apartado 2.4.5.

En primer lugar, para tener una referencia del acabado de cada ensayo tenemos que medir la rugosidad de una placa de PVC sin deformar, en cada medida de rugosidad se realizan 3 medidas en lugares diferentes para tener una idea más o menos:

RUGOSIDAD DEL PVC SIN DEFORMAR: 0.217, 0.118, 0.350 MICROMETROS

Es decir, si se realiza una media de las 3 medidas el PVC tiene una rugosidad de 0.228 μm .

A continuación, se realiza una tabla comparativa de las diferentes geometrías de punta que hemos ensayado:

FORMA PUNTA	MEDIDA 1 (μM)	MEDIDA 2 (μM)	MEDIDA 3 (μM)	MEDIA (μM)
OVOIDE R3	2.382	2.306	1.966	2.218
ESFERA R12	0.432	0.464	0.320	0.405
ESFERA R8	0.522	0.454	0.652	0.543
CONO R3	0.898	0.728	0.829	0.818
ESFERA R10	0.255	0.207	0.276	0.246

Tabla 7 Medidas de rugosidad geometría cónica

Con respecto a acabados superficiales, podemos observar que ocurre a la inversa que la fuerza, el grupo de las puntas esféricas es el más idóneo para realizar este tipo de ensayos si lo que queremos es un buen acabado superficial, claramente el que peor acabado tiene es el ovoide con diferencia.

4.4. Resultados de rugosidad para geometría con ángulo variable.

FORMA PUNTA	MEDIDA 1 (μm)	MEDIDA 2 (μm)	MEDIDA 3 (μm)	MEDIA (μm)
ESFERA R10	0.229	0.445	0.352	0.342
CONO R3	0.559	0.763	0.710	0.677
ESFERA R12	0.277	0.375	0.579	0.410
OVOIDE R3	1.254	1.755	1.480	1.496
ESFERA R8	0.457	0.489	0.416	0.454

Tabla 8 Medidas de rugosidad geometría frustrum

Con respecto a rugosidad obtenemos los mismos resultados tanto para la geometría recta como para el frustrum, la punta que mejor acabado consigue es la punta esférica de diámetro 10 mm siguiéndole la de 12 y 8 mm, después la cónica y por últimos la ovoide.

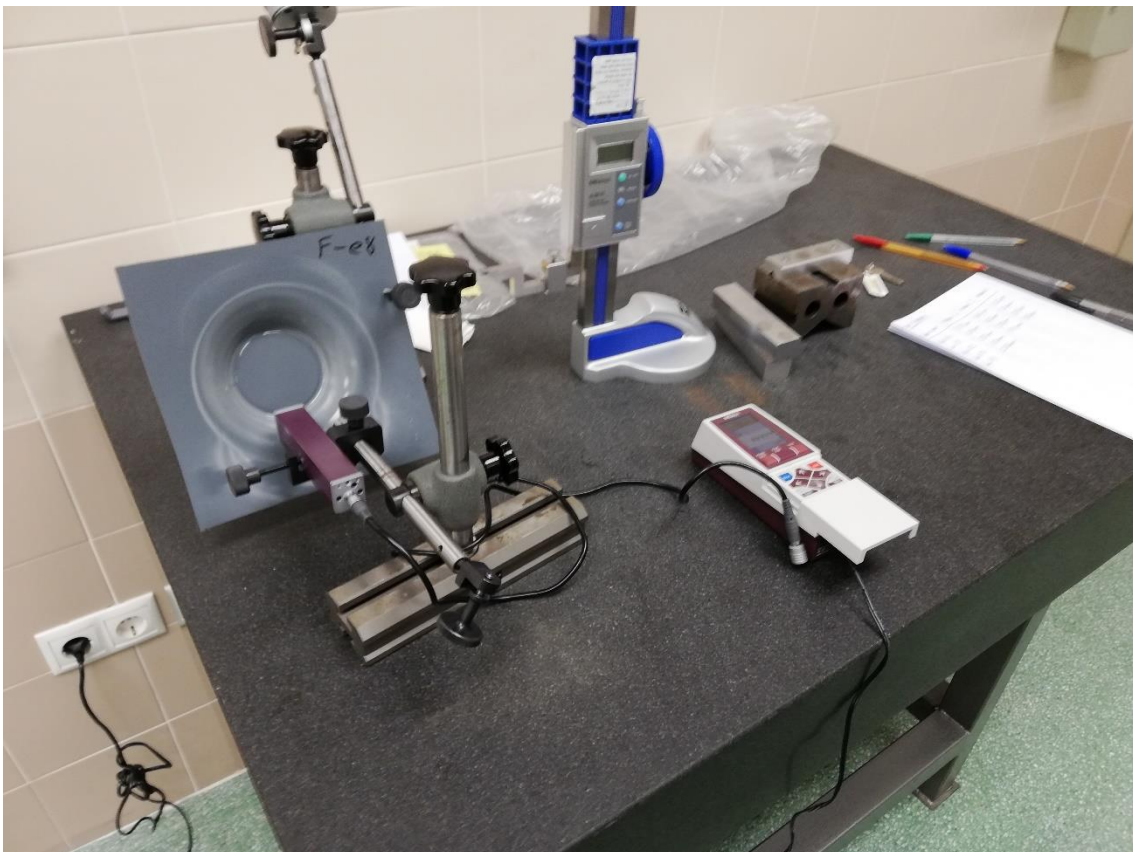


Ilustración 4.11 Esquema de medida de rugosidad

5. CONCLUSIONES.

Como conclusiones finales sobre nuestro estudio podemos obtener que:

El proceso SPIF es perfectamente reproducible de forma efectiva con la maquina utilizada. El procedimiento llevado a cabo permite la fabricación de prototipos de geometrías sencillas.

La geometría del punzón y de la pieza afecta a las fuerzas de conformado y rugosidad, como se ha visto durante la elaboración del trabajo y como es lógico al variar la geometría del punzón y el tipo de ensayo en la placa varían los resultados de fuerza y rugosidad para cada ensayo.

Como se puede observar en las tablas de resultados de fuerza, esta aumenta con el diámetro en punzones esféricos. Esto es debido a que hay una mayor superficie de contacto con este tipo de punzones y se deforma un mayor volumen de material.

Los punzones que no tienen forma convencional como es la esférica, tienen resultados de menores fuerzas ya que la zona de contacto en la realización del ensayo es menor debido a su radio de punta pronunciado.

Sin embargo, si observamos los resultados de rugosidad obtenidos podemos decir que en cuanto a acabado superficial los punzones con formas esféricas tienen mucho mejor acabado que los punzones con puntas pronunciadas, no varía tanto de la punta cónica, pero si el ovoide es el que se obtiene peores acabados superficiales en las dos trayectorias realizadas.

Como observaciones finales podemos destacar que:

La punta que mejor se adapta a los ensayos depende mucho de las condiciones deseadas del ensayo, es decir, si estamos trabajando con una placa muy frágil y que puede ser que rompa fácilmente al aplicar una fuerza y no nos interesa su acabado final si no la fuerza que se está aplicando entonces la punta idónea es la cónica ya que en ambas geometrías se puede observar que es la que alcanza unos valores de fuerza menores.

Por otro lado, si estamos trabajando con una placa por ejemplo de aluminio que no nos interesa la fuerza que se le aplica ya que resiste fácilmente, pero si queremos que tenga un acabado final de buena calidad entonces debemos de elegir una punta del grupo de las esféricas, destacable es la de 10 mm ya que es la que mejor se comporta en rugosidad en nuestros ensayos tanto para la geometría variable como para la fija.

Si queremos algo intermedio en la que los valores de fuerza no sean muy excesivos, pero también queremos un buen acabado superficial la opción correcta sería una esférica de 8 mm ya que se encuentra en valores de fuerza medios y de rugosidad no excesiva.

Es decir que la punta que nosotros queramos escoger depende mucho de las condiciones a las que estamos trabajando y las condiciones finales deseadas, con respecto a rugosidad valores que sean por debajo de la micra son buenos acabados.

Añadir como conclusión final también lo que se mencionó anteriormente, que las puntas con una forma muy excesiva, es decir, con un radio de punta muy pequeño, concretamente por debajo de 3 mm, no son adecuadas para trabajos de este tipo ya que los acabados no son los deseados por que se desplaza material.

6. TRABAJOS FUTUROS.

Como trabajos futuros, en primer lugar, podemos decir que sería bastante acertado estudiar por que las puntas que hemos descartado, es decir, con un radio de punta menor a 3 mm, tienen esos acabados y buscar alguna alternativa o forma de introducirlos en el mercado, intentar que los resultados fueran óptimos y compararlos con los anteriores ya que quizás se obtengan mejores resultados.

Otro trabajo futuro sería estudiar las puntas cónicas más en profundidad, es decir, ya que se han obtenido buenos resultados sería bueno fabricar variedad de puntas cónicas de distintos radios de punta y ángulos de cono, probar a realizar ensayos de geometría fija y analizar los resultados obtenidos.

Otra posibilidad de estudio sería la de estudiar diferentes condiciones distintas a estas, pero con las mismas formas de punta, es decir se podría estudiar la temperatura, la velocidad...

Además, podríamos estudiar más a fondo la influencia de la geometría del punzón en la formabilidad de la pieza y en la geometría final de la misma, así como diferentes materiales del punzón y de la chapa con las geometrías ya estudiadas.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Cazalla Moral, R. (2017) *Simulación de un SPIF*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [2] Jódar Carrasco, F.M. (2018) *Análisis mediante software Abaqus de la influencia de diferentes parámetros mediante SPIF*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [3] Hussain G., Gao L., Quijian L. (2007) *The effect of variation in the curvature of part on the formability incremental forming*. College of Mechanical Electrical Engineering.
- [4] Página web del grupo Alecop. Características del torno eclipse.
<https://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/fabricacion-mecanica/fresadoras/torno-eclipse/>
- [5] Página web del grupo Alecop. Características de la fresadora odisea.
<https://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/fabricacion-mecanica/fresadoras/fresadora-odisea/>
- [6] Página web de sariki. Características del rugosímetro Mitutoyo.
<http://www.sariki.es/productos/info/1443/rugosimetro-portatil-mitutoyo-sj-210/>