



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

INFLUENCIA DEL PUNZÓN EN LA DEFORMACIÓN MONOPUNTO DE LÁMINAS

Alumno: Hidalgo Viveros, Santiago

Tutor: Prof. D. Rubén Dorado Vicente
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio 2019



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

Don Rubén Dorado Vicente , tutor del Proyecto Fin de Master titulado: INFLUENCIA DEL PUNZÓN EN LA DEFORMACIÓN MONOPUNTO DE LÁMINAS, que presenta Santiago Hidalgo Viveros, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2019

El alumno:

Santiago Hidalgo Viveros

Los tutores:

Rubén Dorado Vicente

Índice

1. Introducción	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Material y forma del punzón	11
1.3. Objetivos	11
2. Metodología.....	13
2.1. Caracterización del problema.....	13
2.1.1. Lámina	13
2.1.2. Punzón.....	14
2.1.3. Geometría a desarrollar	16
2.1.4. Trayectoria seguida para la deformación	17
2.2. Diseño experimental.....	18
2.2.1. Factores a estudiar	18
2.2.2. Factores a estudiar tras resultados iniciales	19
3. Materiales y métodos	21
3.1. Utillaje para la adaptación de una fresadora CNC	21
3.2. Máquinas, útiles y equipos de medida	22
3.2.1. Impresora 3D BIBO.....	22
3.2.2. Centro de mecanizado con control numérico	23
3.2.3. Mesa dinamométrica.....	24
3.2.4. Scanner 3D	25
3.2.5. Balanza de precisión.....	25
3.3. Variables a medir	26
4. Métodos experimentales desarrollados	27
4.1. Código ISO.....	27
4.1.1. Generación de la nube de coordenadas en Matlab.....	27

4.1.2. Funciones empleadas en la programación	28
4.1.3. Generación del código ISO	29
4.1.4. Simulación y comprobación del código ISO	29
4.2. Generación archivo “. stl” puntas punzón	30
4.3. Metodología puesta en marcha de los ensayos	31
4.3.1. Preparación impresora 3D	31
4.3.2. Configuración archivo “.stl” para impresión	32
4.3.3. Montaje del utillaje e instrumentos de medida	34
4.3.4. Preparación de la lámina	35
4.3.5. Carga del código ISO	36
4.3.6. Montaje de la lámina y asignación del origen	36
4.3.7. Fijación punta de PLA reforzado a la base del punzón	38
4.4. Post-Procesado de los ensayos	38
4.4.1. Escaneo 3D	38
4.4.2. Procesado malla generada	39
4.4.3. Perfil, espesor y ángulo de conformado	41
5. Resultados experimentales	43
5.1. Ensayos iniciales	43
5.1.1. Fuerzas	43
5.1.2. Profundidad generada en la muestra	49
5.1.3. Desgaste herramienta	50
5.1.4. Ángulos de inclinación y evolución del espesor	52
5.1.5. Perfil desarrollado	57
5.1.6. Problemática	60
5.2. Ensayos tras resultados iniciales	62
5.2.1. Fuerzas	62

5.2.2. Profundidad generada en la muestra	67
5.2.3. Desgaste herramienta.....	68
5.2.4. Ángulos de inclinación y evolución del espesor	71
5.2.5. Perfil desarrollado	75
6. Comparación resultados obtenidos	78
6.1. Fuerzas	78
6.2. Desgaste herramienta	80
6.3. Ángulos de inclinación y evolución del espesor	81
6.4. Perfil y profundidad	82
7. Comparación resultados con estudios anteriores.....	84
7.1. Fuerzas	84
8. Conclusiones y trabajos futuros.....	86
9. Anexos.....	89
Anexo 1: Código Matlab para la obtención de la nube de puntos y generación archivo “.txt” del código ISO	89
Anexo 2: Código Matlab para el tratamiento de datos y obtención de gráficas	92
Anexo 3: Código Mathematica para el tratamiento del perfil a partir de la malla generada por el scanner 3D	96
Anexo 4: Código Matlab para el procesamiento de datos generados mediante el código anterior con el fin de mejorar la comparación	98
10. Bibliografía.....	101

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Esquema proceso SPIF. Materiales y Métodos (Fuente: (Kumar, Alves, Ingarao, & Oleksik, 2017)).	13
Ilustración 2. Fresa forma cónica (Fuente: https://www.wnt.com/es.html).	14
Ilustración 3. Dimensiones punta forma Cónica (Fuente: https://www.wnt.com/es.html).	14
Ilustración 4. Diseño mediante Catia Punta Cónica.	15
Ilustración 5. Diseño mediante Catia punta esférica.	15
Ilustración 6. Toroide perfil desarrollado (Fuente: (Tisza, 2012)).	16
Ilustración 7. Trayectorias seguidas en estudios anteriores (Fuente: (González, 2015)).	17
Ilustración 8. Trayectoria del punzón en un proceso SPIF (Fuente: (Kumar, Alves, Ingarao, & Oleksik, 2017)).	17
Ilustración 9. Puntas capas paralelas a la cama caliente e inclinación 45°.	20
Ilustración 10. Soporte principal.	21
Ilustración 11. Base intercambiable.	22
Ilustración 12. Anillo superior utillaje.	22
Ilustración 13. BIBO 2 Touch Laser (Fuente: http://www.ourbibo.com/).	23
Ilustración 14. Centro de mecanizado adaptado para procesos SPIF (Fuente: https://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/fabricacion-mecanica/fresadoras/fresadora-odisea/).	23
Ilustración 15. Mesa dinamométrica (Fuente: https://www.kistler.com/en/product/type-9257ba/).	24
Ilustración 16. Diagrama conexión componentes mesa dinamométrica (Fuente: https://www.kistler.com/?type=669&fid=75338&model=document).	24
Ilustración 17. Scanner 3D EinScan-SP (Fuente: http://en.shining3d.com/digitizer_detail-4476.html).	25
Ilustración 18. Balanza de precisión AHS-1200 (Fuente: https://www.drogallega.es/u/uploads/File/OFERTAGRAM190115.pdf).	25
Ilustración 19. Chequeo código ISO.	29
Ilustración 20. Chequeo trayectoria seguida por la herramienta.	30

Ilustración 21. Software Ultimaker Cura.	32
Ilustración 22. Configuración parámetros impresión.....	33
Ilustración 23. Segmentación en capas del sólido.....	34
Ilustración 24. Mesa dinamométrica fijada a la base del centro de mecanizado.	34
Ilustración 25. Lámina PVC 200 x 200 mm.....	35
Ilustración 26. Orificio base intercambiable donde tomar el origen.	37
Ilustración 27. Fijación lámina mediante tornillos.	37
Ilustración 28. Scanner 3D y Matriz calibración.....	39
Ilustración 29. Procesado malla mediante "MeshLab".....	39
Ilustración 30. Perfil exterior e interior de la malla.	40
Ilustración 31. Perfil ajustado en el plano XY.	40
Ilustración 32. Perfil interior recortado mediante "MeshLab".	41
Ilustración 33. Esquema cálculo ángulo de conformado.	42
Ilustración 34. Gráfica Fuerza Z frente Tiempo → Punta esférica.	44
Ilustración 35. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Puntas Cónicas.....	45
Ilustración 36. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo.	45
Ilustración 38. Disposición de Fuerzas según posición (Fuente: (Aerens, Eyckens, Van Bael, & Duflou, 2009).	46
Ilustración 39. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta esférica.....	47
Ilustración 40. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta Cónica.	47
Ilustración 41. Gráfica Módulo XY frente Tiempo.	48
Ilustración 42. Pesos finales puntas inclinación 0°.	51
Ilustración 43. Alturas finales puntas inclinación 0°.	52
Ilustración 44. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Esférica 0°.	53
Ilustración 45. Gráfica evolución del espesor → Punta Esférica 0°.	54
Ilustración 46. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Cónica 0°.	55
Ilustración 47. Gráfica evolución del espesor → Punta Cónica 0°.	55
Ilustración 48. Gráfica ángulo de inclinación → Comparativa puntas 0°.	56
Ilustración 49. Gráfica evolución del espesor → Comparativa puntas 0°.	57
Ilustración 50. Perfil Frustrum → Punta Esférica 0°.	58
Ilustración 51. Perfil Frustrum → Puntas Cónicas 0°.	59
Ilustración 52. Perfil Frustrum → Comparativa puntas 0°.	60
Ilustración 53. Gráfica Fuerza Z frente Tiempo → Punta esférica 45°.	63

Ilustración 54. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Punta Cónica 45°	63
Ilustración 55. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Puntas 45°	64
Ilustración 56. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta esférica 45°	65
Ilustración 57. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta Cónica 45°	66
Ilustración 58. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Puntas 45°	66
Ilustración 59. Porcentaje perdida peso final → Puntas 45°	69
Ilustración 60. Porcentaje perdida de altura → Puntas 45°	70
Ilustración 61. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Esférica 45°	71
Ilustración 62. Gráfica evolución del espesor → Punta Esférica 45°	72
Ilustración 63. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Cónica 45°	72
Ilustración 64. Gráfica evolución espesor → Punta Cónica 45°	73
Ilustración 65. Gráfica ángulo de inclinación → Comparativa Puntas 45°	74
Ilustración 66. Gráfica evolución espesor → Comparativa Puntas 45°	75
Ilustración 67. Perfil Frustrum → Puntas Esféricas 45°	76
Ilustración 68. Perfil Frustrum → Puntas Cónicas 45°	76
Ilustración 69. Perfil Frustrum → Comparativa Puntas impresas 45°	77
Ilustración 70. Gráfica comparativa Fuerza Z frente Tiempo → Lubricación por Taladrina.....	78
Ilustración 71. Gráfica comparativa Módulo XY frente Tiempo → Lubricación por Taladrina.....	79
Ilustración 72. Peso Final → Lubricación Taladrina.....	80
Ilustración 73. Altura Final → Lubricación Taladrina.	81
Ilustración 74. Ángulos de inclinación para ensayos con Taladrina.....	81
Ilustración 75. Evolución espesor para ensayos con Taladrina.	82
Ilustración 76. Perfil Frustrum para los ensayos con Taladrina	83
Ilustración 77. Gráfica comparativa Fuerza en Z frente tiempo según geometría y material.....	84
Ilustración 78. Gráfica comparativa Módulo XY frente Tiempo según tipo de geometría y material.....	85

Índice de tablas

Tabla 1. Diseño de experimentos	19
Tabla 2. Diseño de experimentos.	20
Tabla 3. Profundidad muestra → Puntas inclinación 0°.....	49
Tabla 4. Error generado en la profundidad.	50
Tabla 5. Pesos y Alturas obtenidas con puntas impresas 0° de inclinación.	51
Tabla 6. Inclinación máxima → Puntas inclinación 0°.....	56
Tabla 7. Profundidad muestras para puntas de 45°.	67
Tabla 8. Error generado en la profundidad.	68
Tabla 9. Pesos y Alturas obtenidas con puntas impresas 45° de inclinación.	69
Tabla 10. Inclinación máxima → Puntas impresas a 45°.....	74

1. Introducción

Actualmente, el conformado de chapas en la industria suele ser mediante métodos costosos y convencionales como la estampación, embutición o incluso hidro-conformado, pero cada vez más se está creando la necesidad de generar piezas de algún modo alternativo más rápido y económico.

El conformado incremental o en Inglés Incremental Sheet Forming (ISF), y en especial el conformado incremental monopunto (en Inglés, Single Point Incremental Forming, SPIF), podría ser una solución a este problema dado que este tipo de técnica puede ser llevada a cabo por una fresadora convencional y una serie de utillajes de precio despreciable respecto al empleado en los métodos mencionados anteriormente.

Otra ventaja es el alto grado de libertad en el conformado del material, ya que generando una trayectoria mediante cualquier tipo de control CNC (Control Numérico Computerizado) podemos obtener piezas semejantes a las producidas convencionalmente. Actualmente su principal campo de aplicación sería la obtención de prototipos de forma rápida, o la producción de lotes pequeños de componentes, gracias al reducido gasto de utillaje.

Este proceso de conformado también presenta una serie de desventajas cuando se pretende utilizar para producciones de grandes lotes, ya que es un proceso con escasa información, lento y costoso para grandes lotes.

1.1. Antecedentes

Esta técnica vio la luz en la década de los noventa de la mano de Matsubara pensada principalmente para la deformación metálica (Romero, Aguilar, Dorado, & López, Octubre 2013), con el paso de los años este proceso ha ido evolucionando y ha generado un amplio abanico de posibilidades como la introducción de otros tipos de materiales como los polímeros (Martins, Kwiatkowski, & Franzen, 2009) (Jackson & Allwood, 2009).

En los últimos años, los estudios realizados sobre SPIF se han centrado en definir los límites del proceso para poder comprender el comportamiento del

material frente a la deformación, es decir, la mecánica de deformación y establecer distintas configuraciones para obtener una estrategia óptima para la aplicación de esta técnica.

Algunos ejemplos de estos estudios realizados en la última década podrían ser:

- Demostración experimental sobre la relación entre el fallo del material y el gradiente de la fuerza para prevenir este. (Ambrogio, Filice, & Micari, A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming, 2006).
- Estrategias seguidas para la generación de trayectorias con el fin de superar los límites del proceso, precisión y variaciones de espesor (Skjødt, Hancock, & Bay, 2007).
- Modificación de parámetros tales como diámetro de la herramienta, espesor de la lámina, tamaño del paso y ángulo de pared para conocer la influencia de estos parámetros en la fuerza aplicada y los ángulos obtenidos en el conformado (Duflou, Tunc, Kol, Szekeres, & Vanherck, 2007) (Kumar, Alves, Ingarao, & Oleksik, 2017).
- Estudios sobre la formabilidad del material para determinar el ángulo máximo de deformación (Tisza, 2012).
- Estudios sobre el avance. Estos estudios afirman que es posible realizar un conformado SPIF de alta velocidad y esto favorecería al comportamiento dúctil del material permitiendo obtener mayores ángulos de conformado (Ambrogio, Gagliardi, Bruschi, & Filice, 2013) (Vanhove, Mohammadi, Guo, & Duflou, 2014).
- Obtención de mayores ángulos de conformado utilizando una orientación óptima de la pieza o implementación de calor sobre la lámina (Vanhove, Gu, Sol, & Duflou, 2011) (Xu, y otros, 2016).

1.2. Material y forma del punzón

La mayoría de estudios existentes sobre SPIF no prestan atención al material o a la forma del punzón. Generalmente se emplean punzones de aluminio o de acero con formas semi-esféricas.

De hecho, en el área de “Ingeniería de los Procesos de Fabricación” de la Universidad de Jaén, se han realizado ensayos empleando punzones de aluminio con una geometría semi-esféricas de radio 5 mm similares a los encontrados en la bibliografía sobre esta temática.

Podría ser interesante realizar ensayos experimentales con materiales y formas diferentes de punzón, de manera similar a lo que ocurre actualmente con las herramientas que se emplean en el fresado.

En el caso de la geometría, esto tiene especial interés en el área de procesos de fabricación del departamento, ya que complementará un estudio numérico realizado en el departamento el pasado curso. Jódar (2018) ensayó numéricamente punzones con geometría cónica, de barril, ovoide y lente.

De acuerdo con el estudio de Jódar (2018), se observa que el uso de un punzón en forma de barril es similar a usar el convencional, en cambio usando punzones cónicos u ovoides se reducen las fuerzas ejercidas en el eje vertical y horizontal, pero al aumentar la superficie de contacto, se genera un mayor incremento de temperatura debido al rozamiento (Jódar, 2018) .

1.3. Objetivos

Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es comprobar experimentalmente la influencia del punzón (material y geometría) en la deformación monopunto de láminas.

De forma concreta se pretende:

- Comparar la geometría semi-esférica con la cónica.

- Ensayar puntas poliméricas con y sin carga de fibra, y comparar en el caso semi-esférico con puntas de aluminio previamente ensayadas en el departamento.
- Determinar experimentalmente los parámetros del proceso adecuados para obtener el menor desgaste de los punzones plásticos.
- Extraer conclusiones de los resultados experimentales.

Dentro de las actividades desarrolladas para alcanzar los anteriores objetivos destacan:

- La fabricación de punzones utilizando distintas técnicas.
- El estudio de la viabilidad e influencia del material del punzón.
- El estudio de la formabilidad adquirida según la geometría del punzón.
- Solventar problemas asociados al desgaste y calor generado.
- La adaptación del utillaje diseñado y fabricado anteriormente para convertir una fresadora CNC convencional en un centro de mecanizado SPIF.
- El diseño de experimentos y la realización de ensayos experimentales de conformado de una chapa de plástico con el método SPIF para distintos parámetros del punzón midiendo las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas en la chapa

2. Metodología

En esta sección se expondrá la metodología seguida para la puesta en marcha del estudio sobre la influencia del punzón. Esta metodología será en su mayor parte experimental, cuyos resultados obtenidos se compararán con estudios anteriores para poder sacar conclusiones sobre este estudio.

2.1. Caracterización del problema

Como idea principal, se pretenderá deformar una lámina de PVC con el fin de obtener una geometría en forma de frustrum, esta deformación se podrá llevar a cabo gracias a una fresadora convencional, el utillaje necesario para la transformación en una máquina SPIF y un punzón que ejerce presión sobre la lámina, tal y como se muestra en la Ilustración 1.

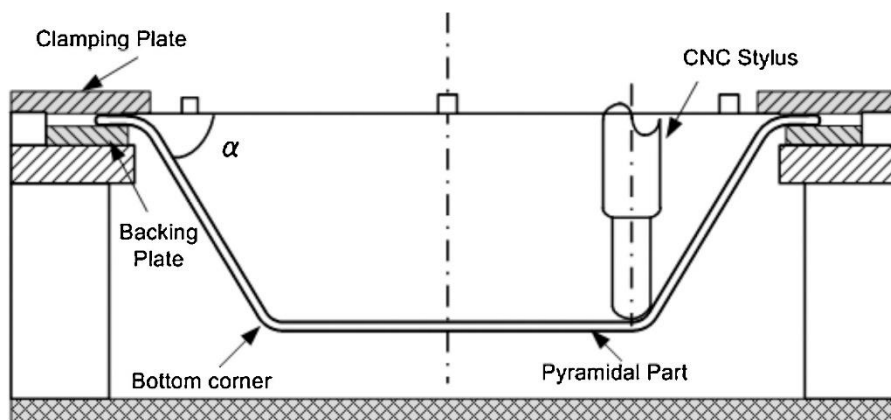


Ilustración 1. Esquema proceso SPIF. Materiales y Métodos (Fuente: (Kumar, Alves, Ingarao, & Oleksik, 2017)).

2.1.1. Lámina

Frecuentemente, las láminas utilizadas en procesos SPIF son metálicas, pero para continuar con los estudios realizados por el área de “Ingeniería de los Procesos de Fabricación” de la Universidad de Jaén se empleará una lámina de PVC.

Basándonos en estudios anteriores se empleará una lámina de PVC de 3 mm y dimensiones 200 x 200 mm como material base del estudio a realizar. Esto genera la oportunidad de comparar estudios para obtener

conclusiones, además de ahorrar tiempo debido a que este material ha sido caracterizado y ensayado anteriormente.

2.1.2. Punzón

Continuando con estudios anteriores (Jódar, 2018), se realizará el estudio utilizando los punzones que mejores resultados han generado. Del estudio mencionado, se concluye que el punzón que mejores resultados obtiene son los que tienen forma cónica, por este motivo se realizarán los ensayos con forma cónica y forma esférica para poder comparar.

En primer lugar, la punta cónica presenta una geometría peculiar, la cual puede apreciarse en la Ilustración 2, con dimensiones especificadas en la tabla de la Ilustración 3.

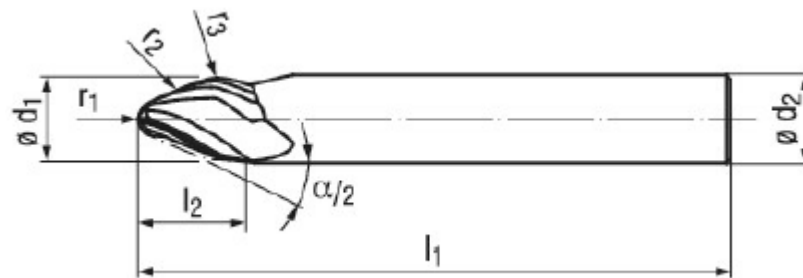


Ilustración 2. Fresa forma cónica (Fuente: <https://www.wnt.com/es.html>).

	d ₁ DC mm	l ₂ APMX mm	l ₅ LPR mm	l ₁ OAL mm	d _{2,h6} DCONMS mm	α°/2	r ₁ PRFRAD1 mm	r ₂ PRFRAD2 mm	r ₃ PRFRAD3 mm	ángulo del perfil
i»	10	12,5	40	80	10	20	2	250	5	40

Ilustración 3. Dimensiones punta forma Cónica (Fuente: <https://www.wnt.com/es.html>).

Mediante el software Catia se ha podido general la punta cónica, con las dimensiones comentadas anteriormente. También se ha diseñado una espiga de sujeción para el anclaje con la herramienta (Ilustración 4).

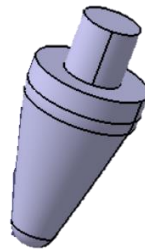


Ilustración 4. Diseño mediante Catia Punta Cónica.

A continuación, la punta esférica contará con las mismas dimensiones que en los ensayos realizados en estudios anteriores (Romero, Aguilar, Dorado, & López, Octubre 2013) con un diámetro de 10 mm (Ilustración 5).

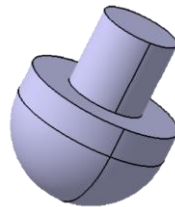


Ilustración 5. Diseño mediante Catia punta esférica.

Igual que en el caso anterior, al diseño de la punta esférica también se le ha añadido una espiga de 5 mm de diámetro, que tendrá una finalidad de unión entre punta y la herramienta.

Finalmente, para la puesta en marcha de los ensayos, las puntas de los punzones serán generadas gracias a una impresora 3D facilitada por la Universidad de Jaén. Esto aportará libertad a la hora de fabricar nuevas geometrías y un coste reducido en su producción.

La impresora 3D convencionalmente trabaja con PLA, el cual es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, obtención a partir de recursos renovables, y muy versátil. Debido a la facilidad de manipulación y versatilidad, se considerará como material base a la hora de realizar los ensayos. Por otro lado, este material presenta una desventaja principal, al centrarse el proceso de conformado incremental monopunto en la deformación a raíz de fricción y presión entre dos materiales con durezas similares, se vería afectada su integridad en el proceso, es decir, la punta

se desgastaría por completo antes de finalizar los ensayos. Por este motivo, aunque se realizaron pruebas con PLA para verificar lo anterior, se ha decidido planificar los ensayos con PLA reforzado con fibra de carbono, ya que aporta la dureza extra necesaria para poder llevar a cabo los ensayos pertinentes en este estudio.

2.1.3. Geometría a desarrollar

Como se ha comentado en el apartado 2.1.2. Punzón, debido al uso de nuevas geometrías, se pretende comprender la formabilidad que otorgan los nuevos punzones. Para conocer la formabilidad obtenida se seguirán las pautas indicadas según M. Tisza (Tisza, 2012) en la generación de un frustrum con el perfil que se muestra en la Ilustración 6.

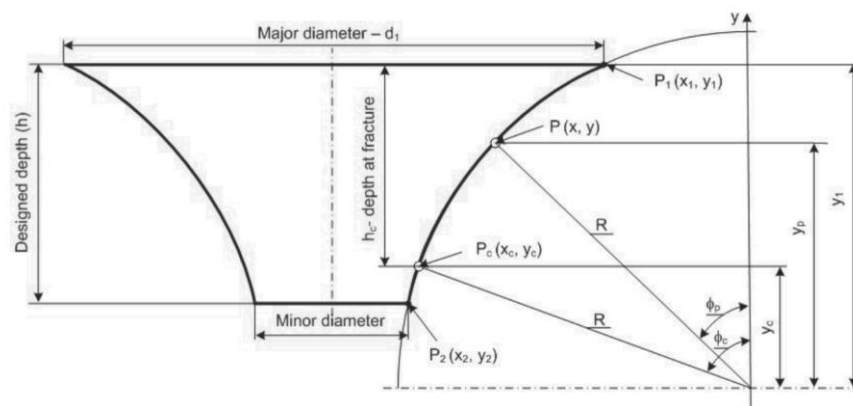


Ilustración 6. Toroide perfil desarrollado (Fuente: (Tisza, 2012)).

Gracias a esta figura, dependiendo de la zona donde se produzca la rotura o el fallo del material, se podrá determinar el ángulo permisible que nos proporciona el uso de estos elementos.

En un análisis inicial y conocidos el límite establecido para el PVC de un máximo de 66° de inclinación, se generará un frustrum con un ángulo final de 75° , el cual es mayor al máximo, esto aportará la información necesaria respecto al ángulo máximo que soportará el PVC mediante el uso de estas nuevas herramientas y materiales.

Otros factores a tener en cuenta en el frustrum es el diámetro mayor que viene designado por el utillaje empleado en el proceso proporcionado

por la Universidad de Jaén. Según este utillaje el diámetro mayor empleado será de 130 mm y una profundidad, también restringido por el utillaje, de 45 mm.

Con la extracción de estos datos, tras la deformación o rotura, se calculará el ángulo máximo permisible, tal y como se expone en (Tisza, 2012).

2.1.4. Trayectoria seguida para la deformación

En la trayectoria generada para la puesta en marcha de la deformación incremental monopunto se han tenido en cuenta las siguientes pautas. En primer lugar, para continuar con la metodología empleada anteriormente (Ilustración 7), se realizará una altura de paso de 0,5 mm en el eje Z.

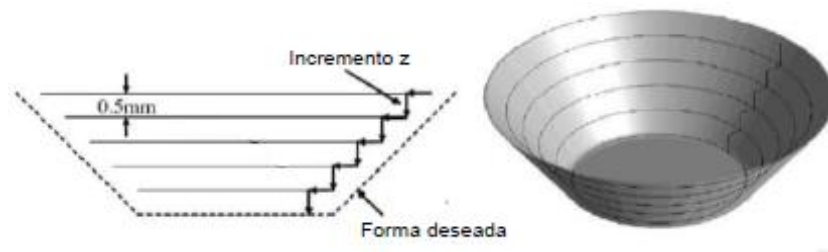


Ilustración 7. Trayectorias seguidas en estudios anteriores (Fuente: (González, 2015)).

Definido el paso en el eje Z y debido a las limitaciones presentadas por la máquina CNC empleada, se generará una trayectoria donde realizará una circunferencia en el plano XY de un diámetro adecuado, para a continuación, reducir el diámetro y moverse en el eje Z la altura de paso asignada. Finalmente, se realizará otra circunferencia, estos pasos se repetirán hasta alcanzar la profundidad y forma deseada.

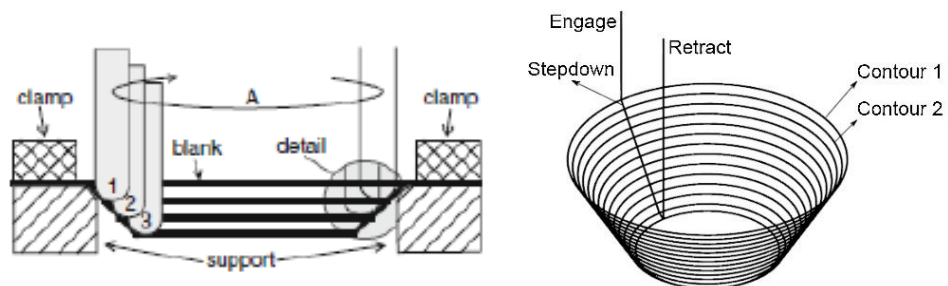


Ilustración 8. Trayectoria del punzón en un proceso SPIF (Fuente: (Kumar, Alves, Ingarao, & Oleksik, 2017)).

2.2. Diseño experimental

Una vez se ha definido el problema a estudiar (2.1. Caracterización del problema), se definirá cual será la estructura o metodología que sigan los ensayos, para ello se ha de seleccionar las variables que influyen en el proceso a estudiar.

2.2.1. Factores a estudiar

Estudiando las distintas variables que influyen en este proceso se toman como vitales, en una primera instancia, la geometría del punzón con el que se desarrollara la deformación y la disipación de calor en la punta del punzón.

Los punzones serán fabricados, gracias a una impresora 3D, a partir de PLA reforzado con el cual se ha podido comprobar gracias a los ensayos preliminares que proporciona una mayor resistencia al desgaste y cizalladura. Se decide realizar los ensayos en plástico para conocer la viabilidad de este material en este proceso y debido a la gran libertad y rentabilidad del uso de este material en caso favorable de estos ensayos.

Respecto a la disipación de calor, se proponen dos estrategias mediante lubricación, es decir, mediante lubricación por aceite y con aceite + agua. Esto ayudará a la selección de un tipo de lubricación o considerar introducir alguna variable.

La velocidad de giro de la herramienta se mantendrá constante a una velocidad baja de 60 mm/min. Esto favorecerá el desgaste uniforme de la punta de PLA reforzado con fibra de carbono, beneficiando el estudio posterior del desgaste producido en la punta tras el empleo de distintos lubricantes.

Ensayo	Geometría de la Punta		Lubricación	
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina
1				
2				
3				
4				

Tabla 1. Diseño de experimentos

Se realizarán los ensayos con las puntas con forma cónica (Ilustración 4) y con la esférica (Ilustración 5), imprimidas en capas paralelas a la cama caliente, y así poder comparar los resultados entre ellas y con los ensayos de otros estudios realizados con la punta esférica pero fabricada en otros materiales.

2.2.2. Factores a estudiar tras resultados iniciales

Completados una primera tanda de ensayos y comprobados los resultados obtenidos, se desea aumentar la resistencia de la espiga del punzón para eliminar la cizalladura en la base de esta.

Las puntas empleadas en los ensayos se obtienen a partir de impresión 3D por FDM, en la máquina que se detalla en la memoria. La espiga aumentará su resistencia a la cizalladura dependiendo de la inclinación que se imponga en la impresión.

En ensayos anteriores, la inclinación con la que se imprimía las puntas era nula, por lo que las capas de las puntas eran perpendiculares a la fuerza de cizalladura, lo que favorecía a está, generando rotura o separación de capas. Para eliminar o intentar solventar este problema, se imprimirán las puntas con una inclinación de 45° por lo que en la base de la espiga las capas tengan inclinación con la fuerza de cizalladura y mayor número de capas en esta sección lo que generará un aumento en su resistencia.

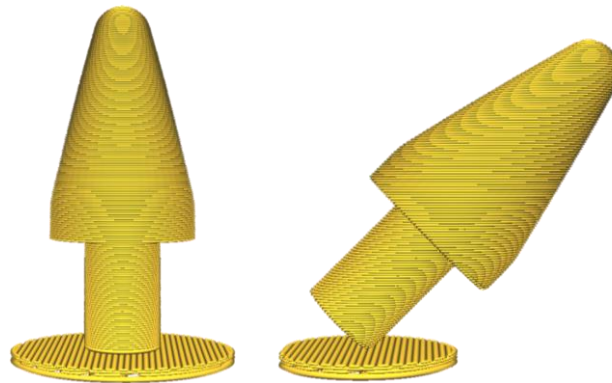


Ilustración 9. Puntas capas paralelas a la cama caliente e inclinación 45°.

Establecido el método de impresión, se realizarán los mismos ensayos que en el punto anterior y así, poder comparar y establecer conclusiones respecto al cambio de inclinación.

Los ensayos a realizar serán los siguientes, teniendo en cuenta que la velocidad de giro de la herramienta permanece constante limitando el giro para favorecer el desgaste uniforme de la punta.

Ensayo	Punta		Lubricación		Inclinación impresión
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina	
1.1					45°
2.1					45°
3.1					45°
4.1					45°

Tabla 2. Diseño de experimentos.

Como en los ensayos anteriores, se realizarán con ambas geometrías de punta y con ambas lubricaciones para finalmente intentar obtener conclusiones de la utilización de este tipo de puntas y material en un proceso de conformado incremental monopunto.

3. Materiales y métodos

En esta sección se recopilará toda la información acerca del utillaje empleado para la puesta en marcha de los ensayos, así como la maquinaria utilizada, y la metodología empleada a la hora de realizar los ensayos y la obtención de resultados.

3.1. Utillaje para la adaptación de una fresadora CNC

En la adaptación de una fresadora CNC a un proceso de deformación monopunto SPIF principalmente se necesitará un soporte donde anclar la lámina del material a ser deformado. Este método de anclaje o soporte contará con 3 partes. En primer lugar, se compone de un soporte principal (Ilustración 10) el cual se fija a la mesa o cama de la fresadora mediante unos tornillos.

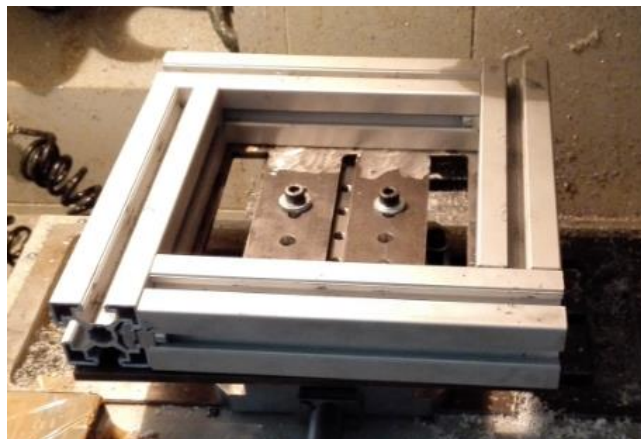


Ilustración 10. Soporte principal.

Por otro lado, es necesario el uso de una base intercambiable (Ilustración 11) cuya finalidad será la de orientar el inicio de la deformación y ofrecer la forma correcta a la deformación. Además, gracias a los tornillos pasantes, ayudará a la fijación de la lámina e impedir su desplazamiento en el plano paralelo a la superficie del orificio.



Ilustración 11. Base intercambiable.

Para fijar por completo la lámina al utillaje se utiliza un anillo superior, el cual se fija a partir de los tornillos pasantes y unas tuercas impidiendo el desplazamiento de la lámina mediante la deformación.

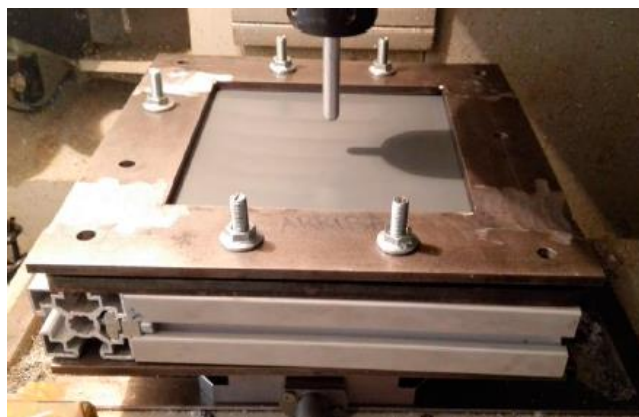


Ilustración 12. Anillo superior utillaje.

3.2. Máquinas, útiles y equipos de medida

En este apartado, se verá la maquinaria e instrumentos empleados en los ensayos experimentales, gracias a los cuales se puede desarrollar el estudio de la influencia del punzón en un proceso SPIF.

3.2.1. Impresora 3D BIBO

Las puntas necesarias para la realización de los distintos ensayos se han obtenido gracias a una impresora 3D, BIBO 2 Touch Laser. Esta impresora cuenta con doble extrusor directo con una resolución de capa de hasta 50 micrometros.

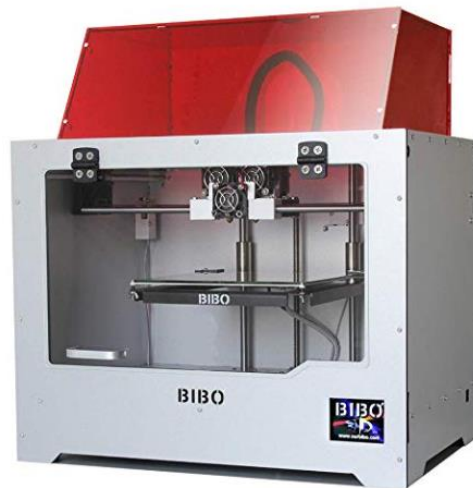


Ilustración 13. BIBO 2 Touch Laser (Fuente: <http://www.ourbibo.com/>).

3.2.2. Centro de mecanizado con control numérico

La máquina elegida para llevar a cabo este estudio fue un centro de mecanizado con control numérico, marca ALECOP, modelo ODISEA. Este centro de mecanizado tiene un control numérico FAGOR 8050M. Todas las adaptaciones que se han visto en puntos anteriores fueron desarrolladas para este modelo.



Ilustración 14. Centro de mecanizado adaptado para procesos SPIF (Fuente: <https://www.alecop.com/equipamiento-didactico/areas/fabricacion-mecanica/fresadoras/fresadora-odisea/>).

3.2.3. Mesa dinamométrica

El grupo de trabajo de fabricación del área de “Ingeniería de los Procesos de Fabricación” de la Universidad de Jaén cuenta con una mesa dinamométrica marca KISTLER modelo 9257BA que es capaz de medir el valor de las fuerzas que se están aplicando en los tres ejes cartesianos.



Ilustración 15. Mesa dinamométrica (Fuente: <https://www.kistler.com/en/product/type-9257ba/>).

Para el correcto funcionamiento de esta mesa dinamométrica es necesario el uso de una unidad de control y un cable de conexión, ambos son proporcionados por la misma marca KISTLER siendo los modelos 5233A1 y 1500B5 respectivamente. El método de conexión de los componentes con el PC será como se indica en la siguiente Ilustración. (KISTLER, 2003)

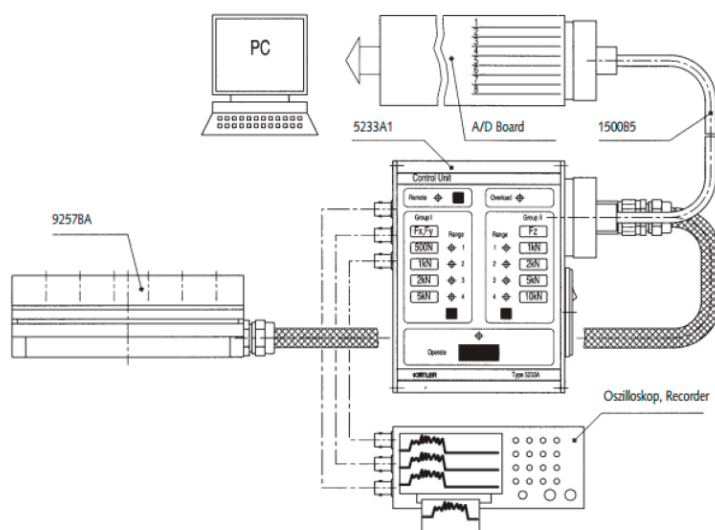


Ilustración 16. Diagrama conexión componentes mesa dinamométrica (Fuente: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=75338&model=document>).

3.2.4. Scanner 3D

El scanner 3D empleado en el reconocimiento de la geometría obtenida mediante el conformado presenta una precisión de 0,05 mm en tan solo un escaneo, cuenta con una mesa giratoria que permite rotar el objeto a escanear 360° en tan sólo un minuto.



Ilustración 17. Scanner 3D EinScan-SP (Fuente: http://en.shining3d.com/digitizer_detail-4476.html).

El campo de trabajo del scanner está limitado a un volumen mínimo de 3 x 3 x 3 cm y un máximo de 20 x 20 x 20 cm en modo automático, este volumen se puede ampliar hasta 120 x 120 x 120 cm si se usa el modo libre.

3.2.5. Balanza de precisión

En la medición del peso de las puntas impresas se empleará una balanza de precisión del proveedor Gram Precisión S.L., la cual tiene una capacidad de 1200 g con 0,01 g de resolución y 130 mm de diámetro de plato. Esta balanza corresponde a la serie AHS modelo 1200.



Ilustración 18. Balanza de precisión AHS-1200 (Fuente: <https://www.drogalleja.es/u/uploads/File/OFERTAGRAM190115.pdf>).

3.3. Variables a medir

Descrito el utillaje y maquinaria empleada en el estudio, se expondrá la finalidad de la utilización de estos elementos, es decir, las variables a medir.

Principalmente, las variables a estudiar son la fuerza generada y la geometría de la lámina tras la deformación, a estas variables, se le puede añadir otros secundarios como producto del proceso.

Al realizar el proceso de deformación, se generan parámetros secundarios los cuales convendría estudiar como el desgaste en la punta de la herramienta, el ángulo máximo obtenido de conformado, la evolución del espesor y la influencia de la inclinación de las capas, a la hora de imprimir la punta de la herramienta, en el proceso desarrollado.

Todos estos parámetros ayudarán a comprender un poco mejor este proceso de conformado, cuando se utilizan herramientas no convencionales. Su análisis se realizará en secciones posteriores y se compararán los resultados con los obtenidos con herramientas convencionales.

4. Métodos experimentales desarrollados

En esta sección se pretende exponer todo lo necesario para poder comprender y desarrollar la parte experimental de este estudio teniendo en cuenta lo comentado en capítulos anteriores (Hidalgo, 2017).

4.1. Código ISO

El código ISO es el lenguaje utilizado para la programación de una máquina de control numérico, con este código se definirá tanto la trayectoria que realizará la herramienta como las funciones necesarias para el correcto funcionamiento del controlador.

En la generación del código ISO se han de tener en cuenta varios factores que intervienen en el proceso a realizar, por este motivo las funciones usadas se explicarán en los siguientes apartados.

4.1.1. Generación de la nube de coordenadas en Matlab

En la generación del código ISO se han de implementar una gran cantidad de puntos que serán las coordenadas por las que viaje la herramienta a la vez que realiza la deformación, obteniendo finalmente la geometría deseada. Debido a la gran cantidad de puntos, la mejor manera de obtenerlos es a través de la implementación de un código en el software Matlab.

Una vez descrita la geometría a generar, se pasa a la obtención del código, en el cual mediante la introducción de unos parámetros se generará esta nube de puntos automáticamente.

Las variables de entrada para la obtención de la nube de puntos son las siguientes:

- Ángulo final: 75°
- Diámetro inicial: 130 mm
- Radio curvatura figura: 70 mm
- Profundidad de la figura: 45 mm

- Paso entre vuelta y vuelta en el eje Z: 0,5 mm

Estos parámetros serán constantes en todos los ensayos, ya que se pretende obtener la misma geometría para poder comparar y obtener resultados. De esta manera, se obtiene la nube de puntos con las coordenadas de la trayectoria a seguir, pero esta debe ser procesada antes de ser transferida al centro de mecanizado.

4.1.2. Funciones empleadas en la programación

A la hora de decidir qué funciones incluir en el código ISO, se debe aclarar cómo se desarrollará la trayectoria. En primer lugar, se trabajará en planos paralelos al plano XY realizando circunferencias. Una vez realizada dicha circunferencia en cada plano se reduce el valor en el eje Z para cambiar de un plano a otro y realizar nuevamente la circunferencia, pero esta tendrá un diámetro menor dependiendo de los valores de los parámetros.

Para la realización de las circunferencias se usará la función “G02” que realiza arcos que conecta dos puntos, para esta función se tiene que introducir el punto inicial y el punto final del arco. Por limitaciones de la maquinaria, para cada circunferencia se usará dos veces, dividiendo la circunferencia en dos semicircunferencias.

Una vez realizada la circunferencia, se pasará al decremento en el eje Z para ello, se hace uso de la función “G01” que trabaja en los tres ejes de coordenadas y su finalidad es pasar del punto actual de la herramienta al punto que se indica mediante coordenadas en los tres ejes.

Otra función que adquiere un gran rol a la hora de implementar la nube de puntos en el código ISO para el proceso SPIF es la función “G51”. El empleo de esta función es en base al método de ejecución que tiene el centro de mecanizado de los códigos, ya que el método usado es leer y ejecutar una orden, parada, leer y ejecutar la siguiente orden, y así continuamente. Al no disponer de un centro de mecanizado de alta velocidad, estas paradas incrementan el tiempo del proceso

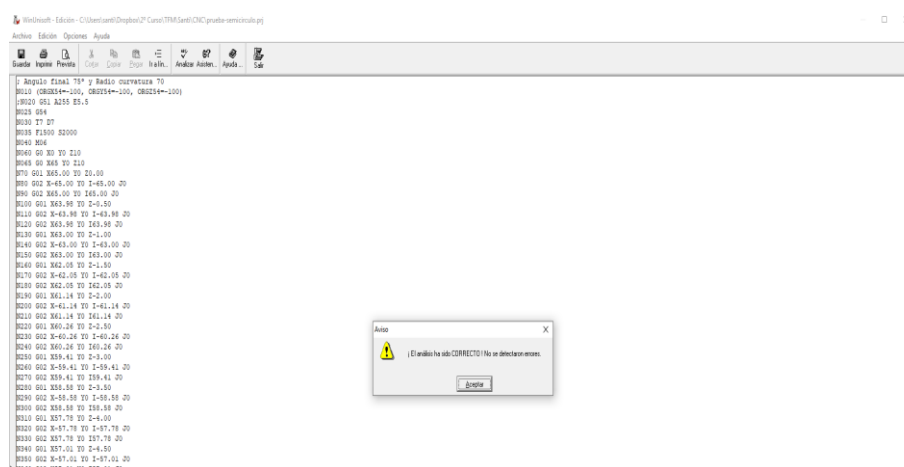
considerablemente, además de una gran oscilación en la fuerza. El “G51” se basa en la lectura anticipada de órdenes, lo que se traduce en la eliminación de las paradas entre orden y orden. Teniendo esto en cuenta, todos los ensayos se realizarán con esta función. (FAGOR AUTOMATION S. Coop.Ltda.)

4.1.3. Generación del código ISO

Generada la nube de puntos, solamente se tendrá que modificar levemente estos puntos para pasarlos al lenguaje ISO. Esto se realizará gracias al mismo código creado para la generación de la nube de puntos, el cual se ha programado para la generación de un archivo “.txt” con la trayectoria en el lenguaje indicado.

4.1.4. Simulación y comprobación del código ISO

Antes de cargar el código ISO en la fresadora de control numérico se debe simular y comprobar que la nomenclatura usada en el código es correcta y que no existe la presencia de ningún error, también se debe comprobar que el recorrido de la trayectoria es correcto. Esto se puede comprobar gracias al software “WinUnisoft” que cuenta con ambas comprobaciones. En la siguiente ilustración, se puede apreciar que el chequeo del código generado es correcto y que el código podrá ser leído por la fresadora a usar.



En la siguiente ilustración, se comprobará que la trayectoria forme la geometría a desarrollar.

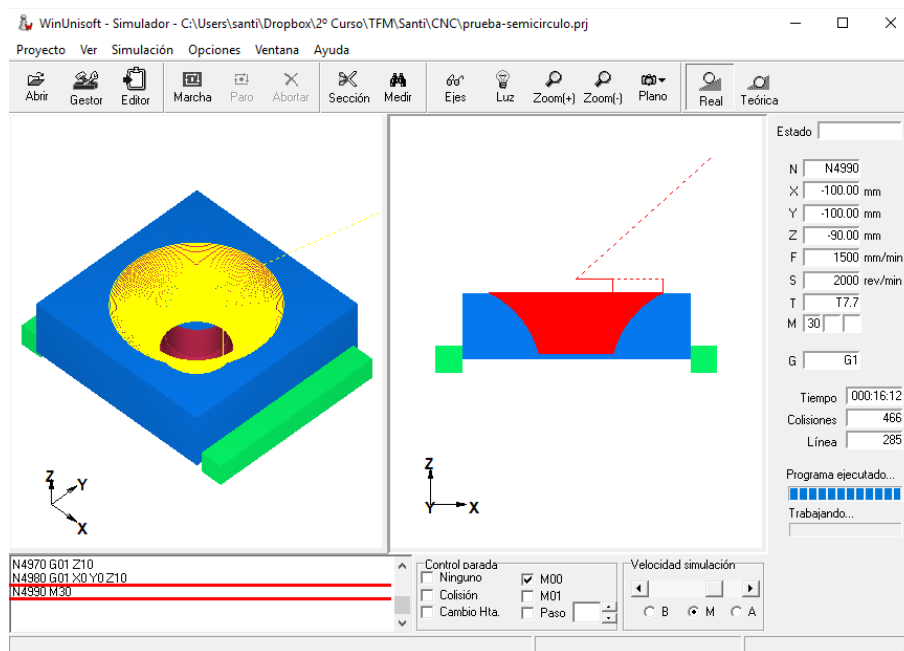


Ilustración 20. Chequeo trayectoria seguida por la herramienta.

Realizadas estas dos comprobaciones, el código estaría listo para ser transferido al centro de mecanizado, dando lugar a la realización de los ensayos pertinentes.

4.2. Generación archivo “. stl” puntas punzón

Seleccionada la geometría de las puntas con las que se realizarán los ensayos (Jódar, 2018), se reproducirá estas gracias a un software de diseño asistido por computadora, que en el caso de este estudio será “Catia”.

Como se indica en secciones anteriores (2.1.2. Punzón), se realizarán los ensayos con dos tipos de geometrías, esférica y cónica, las cuales se han reproducido en el software indicado insertándole las características necesarias para el correcto acoplamiento a la base del punzón con el que se realizará la deformación.

Desarrollado el diseño, se procederá a la generación del archivo en formato “. stl”, formato necesario para los softwares que permiten la

desfragmentación en capas para la posterior carga en una máquina de adición de material, una impresora 3D.

Posteriormente, se procesará adecuadamente este archivo designando todas las variables necesarias que intervienen en la adición de material para la obtención de la punta física.

4.3. Metodología puesta en marcha de los ensayos

Antes de la ejecución de los ensayos experimentales debe de prepararse la maquinaria y material necesario para el correcto funcionamiento de este. En esta sección, se expondrá detalladamente la preparación del utillaje y material necesario para la ejecución de los ensayos.

4.3.1. Preparación impresora 3D

Antes de comenzar con la impresión, se ha de realizar una serie de acciones para la preparación de la impresora. En primer lugar, se debe limpiar la zona de impresión para evitar choques o defectos en la pieza, para ello se limpiará el cristal de la cama caliente para eliminar residuos de impresiones anteriores.

Limpia la impresora, se ha de seleccionar la bobina del material de aportación, en caso de este estudio PLA reforzado con fibra de carbono, y ver la hoja de características, donde indica la temperatura de extrusión y la necesaria en la cama caliente para una fijación adecuada.

El material de aportación necesita ser ajustado en la impresora, para ello, se calienta el extrusor a la temperatura de extrusión del material o un poco superior para favorecer la introducción en el extrusor. Alcanzada esta temperatura, se procederá a la inserción del material mediante la pantalla controladora de la impresora que permite el manejo manual de los rodillos del extrusor.

La impresora estaría lista para fabricar las distintas piezas necesarias. Antes de comenzar cada impresión se recomienda precalentar el extrusor y la cama caliente, tal y como indica el fabricante del material de aportación.

Además de calentar la cama caliente para la fijación³, se utilizará la ca fijadora para mejorar la adherencia a esta.

4.3.2. Configuración archivo “.stl” para impresión

Generado el archivo de la punta en formato “.stl” a partir del software “Ultimaker Cura” (Ilustración 21) se puede configurar la desfragmentación por capas del sólido para su posterior impresión.

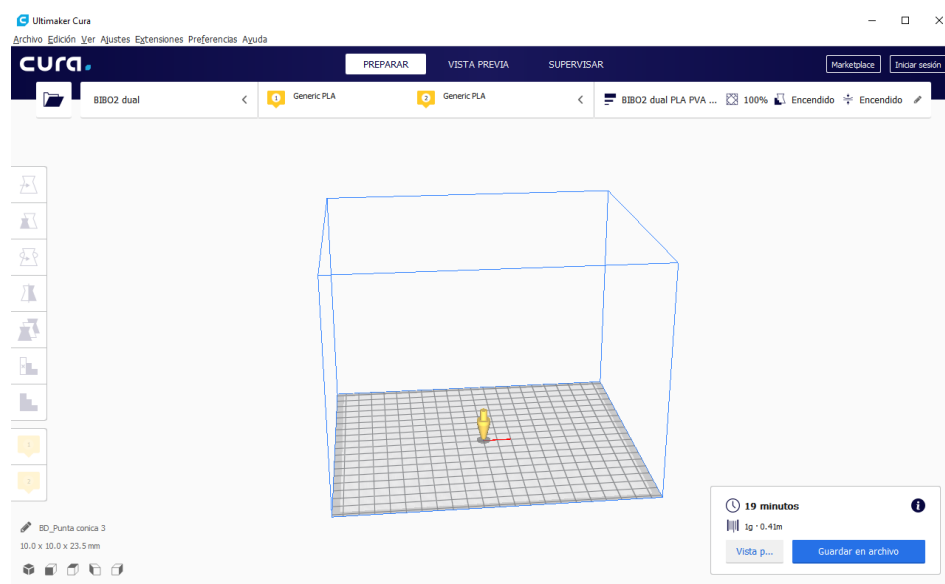


Ilustración 21. Software Ultimaker Cura.

La configuración del software para la impresora, que dispone el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Jaén, se puede realizar a partir del manual facilitado por el fabricante de la impresora BIBO (Shaoxing Bibo Automatic Equipment, 2019) que explica paso a paso como configurar el Ultimaker Cura.

Tras la configuración del software ya se puede configurar los parámetros necesarios para una correcta impresión. Estos parámetros serán los siguientes:

- Altura de capa: 0,15 mm
- Densidad de relleno: 100 %
- Temperatura de impresión (extrusor): 200 °C
- Temperatura de la placa de impresión: 60 °C

- Velocidad de impresión: 30 mm/s
- Generar soporte: Si
- Colocación del soporte: Tocando la placa de impresión
- Adherencia de la placa de impresión: tipo Balsa

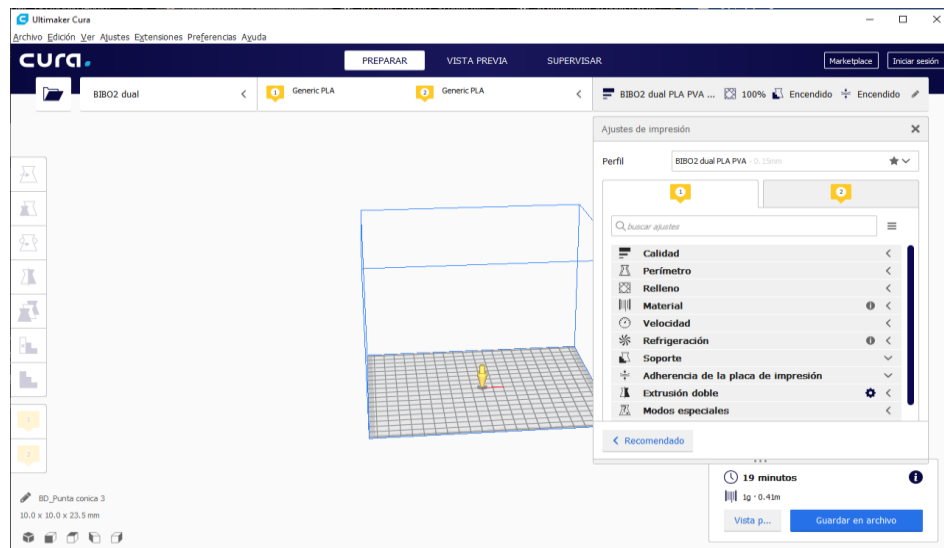


Ilustración 22. Configuración parámetros impresión.

De los parámetros anteriores cabe la necesidad de explicar algunos de ellos. Respecto a las temperaturas son las indicadas por el fabricante, la velocidad de impresión se ha ajustado a 30 mm/s debido a la complejidad de la figura ya que si se imprimía a mayor velocidad la calidad y forma de la pieza final se veía afectada. El material de soporte se ha procesado según la inclinación de la punta debido a que con mayor inclinación es necesario la aportación de más material de soporte para obtener la geometría deseada.

Ajustados todos los parámetros, el software permite la visualización de la segmentación en capas, incluyendo soportes y tipo de adherencia, con una estimación del tiempo de procesado (Ilustración 23). Esto genera una idea de la trayectoria que seguirá el extrusor de la impresora para la realización del sólido y ofrece la oportunidad de comprobar que los parámetros y la configuración se ha realizado tal y como se deseaba. En el

caso de la Ilustración 23, se puede apreciar que la balsa y los soportes han sido generados de acuerdo con lo especificado anteriormente, ya que estos elementos son cruciales para la obtención de la geometría sin desviaciones o deformaciones.

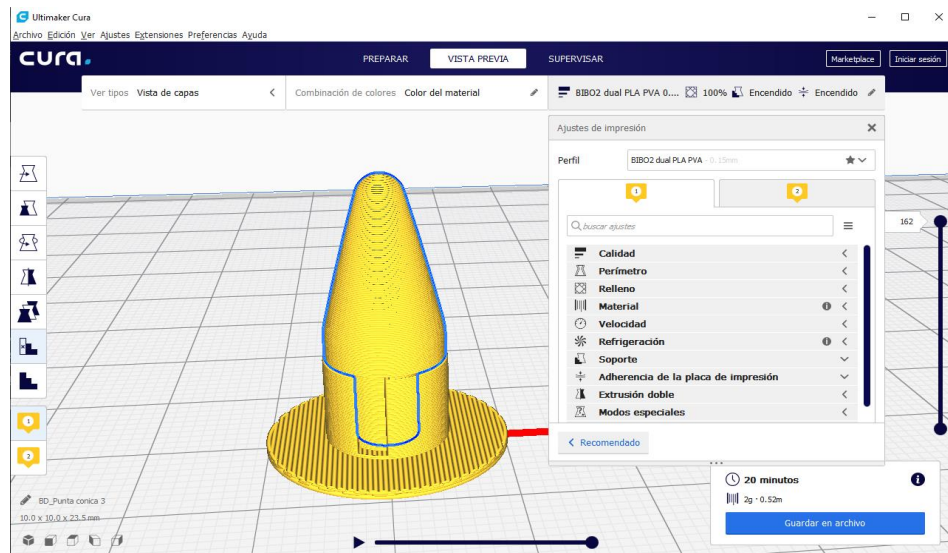


Ilustración 23. Segmentación en capas del sólido.

4.3.3. Montaje del utillaje e instrumentos de medida

En la realización de este estudio se ha utilizado el utillaje e instrumentación descrita en secciones anteriores (3.1. Utillaje para la adaptación de una fresadora CNC) (3.2.3. Mesa dinamométrica).

En primer lugar, se fijará la mesa dinamométrica a la base del centro de mecanizado mediante 4 tornillos de métrica 8 (Ilustración 24). A esta se fijará el utillaje necesario para la correcta fijación de la lámina a deformar.



Ilustración 24. Mesa dinamométrica fijada a la base del centro de mecanizado.

Una vez se tiene fijada la mesa dinamométrica, el soporte ajustara a la mesa dinamométrica a través de 4 tornillos de métrica 8 ya que la mesa dinamométrica cuenta con orificios roscados para esta métrica.

La recopilación de datos se realiza a partir de un lector en un ordenador conectado a la mesa mediante el cable que puede apreciarse en la Ilustración 24 y siguiendo el esquema de la Ilustración 16.

4.3.4. Preparación de la lámina

En el proceso de conformado incremental monopunto se necesita una lámina del material a deformar para su puesta en marcha. En este estudio se ha utilizado una lámina de PVC, tal y como se ha hecho en estudios anteriores.

La lámina de PVC dispone una geometría cuadrada de 200 x 200 mm, esta lámina se obtiene gracias a una sierra de calar convencional y una lámina de PVC de 2000 x 1000 mm. Las dimensiones del cuadrado deben ser mayores al diámetro principal de la geometría a obtener, es decir, en este caso debe ser mayor a 130 mm por este motivo su dimensión es de 200 mm favoreciendo la fijación al soporte.

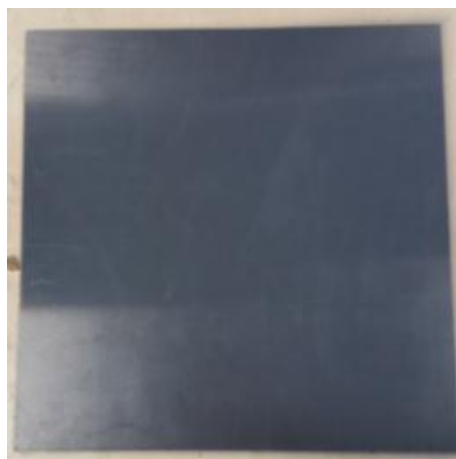


Ilustración 25. Lámina PVC 200 x 200 mm.

4.3.5. Carga del código ISO

La carga del código ISO se realizará a través de un ordenador que tiene el centro de mecanizado como soporte auxiliar. El ordenador cuenta con el software WinUnisoft para el control de dicho centro con el que, además, se puede editar, comprobar y simular el código generado, tal y como se ha visto en secciones anteriores.

Una vez cargado el código ISO, si se necesita su manipulación se puede realizar de manera manual gracias a la botonera y la pantalla integrada en el centro de mecanizado.

4.3.6. Montaje de la lámina y asignación del origen

Completado el montaje del utillaje e instrumentos de medida, se ha de asignar el origen de coordenadas en base a la fresadora y el montaje de la lámina a deformar.

Primero, se realizará la búsqueda del punto de referencia de las coordenadas de la fresadora. Para la asignación del origen de coordenadas se empleará la mesa dinamométrica y el control manual del punzón, de esta manera, se irá moviendo el punzón en un eje hasta que toque con la base intercambiable del soporte. Una vez se detecta presión quiere decir que existe contacto entre punzón y base intercambiable, será ese punto uno de los límites por lo que se pondrá a cero la coordenada actual del eje en el que estamos trabajando.

A continuación, se realiza el movimiento en el mismo eje hasta que exista contacto con el límite opuesto, obteniendo la longitud en el eje de acción del orificio. Como se conoce la longitud de acción en ese eje se colocará el punto sobre la longitud media y este será el origen del eje con el que se está trabajando. Para la obtención del origen en el eje restante se realizará de nuevo el proceso descrito, pero actuando en el eje actual.



Ilustración 26. Orificio base intercambiable donde tomar el origen.

Tras realizar estos pasos se fija el origen en los ejes X e Y, pero aún queda fijar el origen en el eje Z. Antes de designar el último eje, se debe fijar la lámina de 200 x 200 mm, este montaje es muy simple mediante unos tornillos y sus respectivas tuercas, tal y como se puede apreciar en la Ilustración 27.



Ilustración 27. Fijación lámina mediante tornillos.

Finalmente, se designará el origen de coordenadas en el eje Z, que será donde comience la deformación. La designación se realizará de manera similar al resto de ejes, se irá descendiendo el punzón manualmente hasta existir contacto entre punzón y lámina, para ello, se hará uso del dinamómetro que aumentará de valores en la fuerza cuando comience el contacto.

4.3.7. Fijación punta de PLA reforzado a la base del punzón

En la conexión de la punta de PLA reforzado con fibra de carbono y la base del punzón se ha tenido en cuenta distintos factores. En primer lugar, se estudió distintos métodos de conexión como introducción de material roscado en el diseño de la punta, conexión mediante material de aportación o mediante ajuste espiga-orificio.

Finalmente, tras varias pruebas, se llegó a la conclusión que el mejor método de conexión era mediante ajuste espiga-orificio, es decir, la punta se imprimiría con una espiga con un grosor levemente superior a las dimensiones del orificio para forzar el ajuste. Este ajuste se hará efectivo ejerciendo presión y ajustando el grosor a través de la retirada de material gracias a una lima de mano convencional.

Este diseño proporciona una gran libertad a la hora del diseño y asignación del ángulo y posición de impresión debido a la eliminación de elementos externos o posiciones concretas.

4.4. Post-Procesado de los ensayos

Realizados los ensayos pertinentes, por cada ensayo realizado se genera una lámina deformada con la geometría que se iba buscando en el estudio. De esta lámina se puede obtener bastante información si es post-procesada adecuadamente, para ello se han realizado las siguientes operaciones y, así, extraer la información necesaria para el estudio.

4.4.1. Escaneo 3D

En primer lugar, antes de comenzar a trabajar con la muestra obtenida en el ensayo realizado, se ha de realizar la calibración del scanner 3D para asegurar que los datos obtenidos sean correctos y cuenten con el menor error posible.

El calibrado del scanner 3D se realiza a partir de una matriz de puntos proporcionada por el fabricante, esta matriz dispone de circunferencias de distintos diámetros lo que ayuda la calibración del aparato. La matriz se

coloca en la zona de escaneo y, mediante el software específico para este aparato, se realiza el calibrado automáticamente.



Ilustración 28. Scanner 3D y Matriz calibración.

Finalizado el calibrado del scanner, se pasará al escaneo de las muestras obtenidas, colocándolas en la zona de escaneo, Ilustración 28, y ejecutando el software generando una malla de la figura a escanear. La malla puede guardarse en formato .stl o .ply, ambos formatos pueden ser procesados mediante el software “MeshLab” permitiendo ajustar la malla.

4.4.2. Procesado malla generada

Tras la obtención de las mallas generadas, gracias al scanner 3D, se procesan mediante el software “MeshLab y “Ultimaker Cura”.

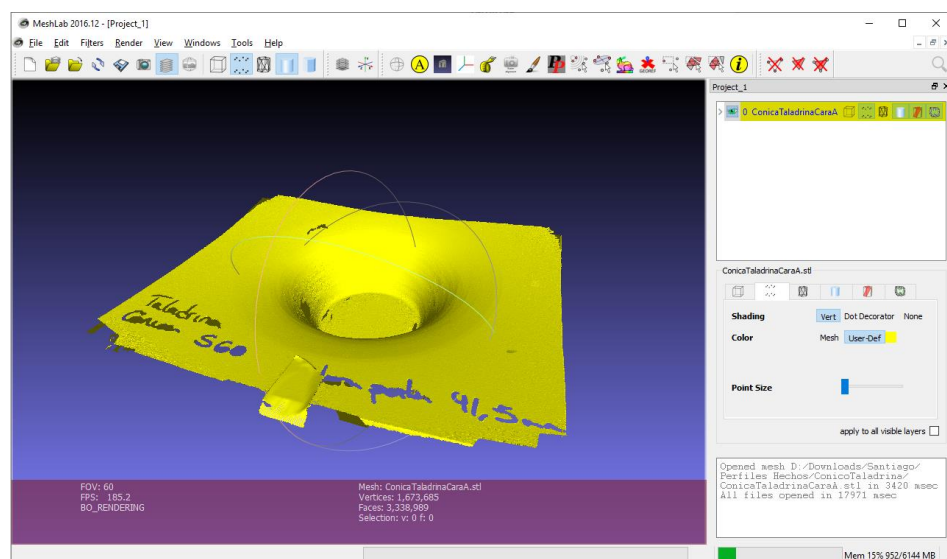


Ilustración 29. Procesado malla mediante "MeshLab".

En primer lugar, se abre la malla a procesar con el software “Meshlab”, donde se obtiene la malla completa de la muestra, la cual se seccionará por la zona central para la visualización de los perfiles, tanto de la cara interna como de la externa, Ilustración 30.

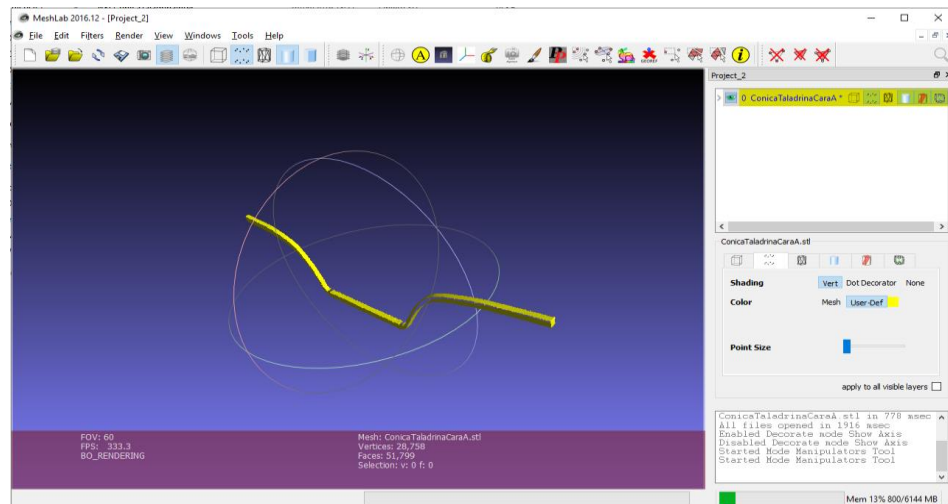


Ilustración 30. Perfil exterior e interior de la malla.

El principal inconveniente del escaneo 3D es la referenciación de la malla frente a los ejes de coordenadas, para ello se ha usado el software “Ultimaker Cura” donde se puede rotar la malla en los tres ejes además de la opción de aplanar, función que se ha usado para la colocación del perfil en el plano XY para, posteriormente, mediante un código en el software “Mathematica” (Anexo 3: Código Mathematica para el tratamiento del perfil a partir de la malla generada por el scanner 3D) se ha generado una matriz de transformación que ajusta perfil de manera, que el eje de las ordenadas sea el eje de simetría del perfil.

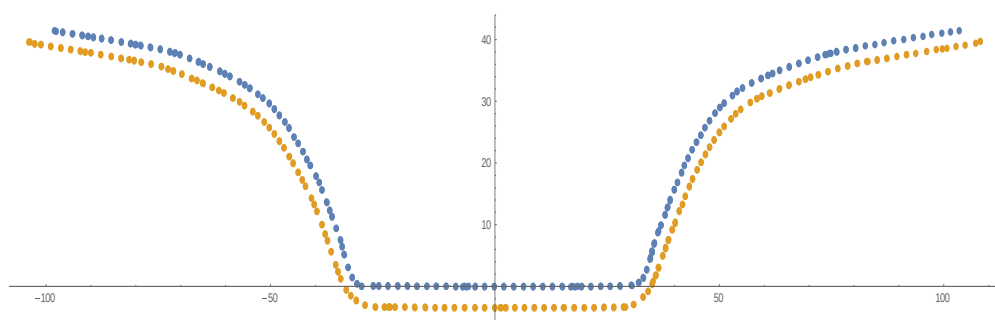


Ilustración 31. Perfil ajustado en el plano XY.

Finalmente, antes del procesado mediante los códigos de Mathematica y Matlab se ha de simplificar la nube de puntos debido a que las mallas generadas por el escáner tienen miles de puntos incrementando su coste computacional, por esta razón se simplifica para facilitar los cálculos posteriores.

4.4.3. Perfil, espesor y ángulo de conformado

Simplificada la nube de puntos y conseguida la orientación del perfil, se realizará el procesado obteniendo la nube de puntos del perfil interior, la evolución del espesor en el proceso y el ángulo de conformado en cada punto, esto ayudará a la comparación entre los distintos recursos utilizados con el fin de comprender mejor la deformación incremental monopunto usando puntas impresas.

La separación entre el perfil externo e interno se lleva a cabo gracias al software "MeshLab", ya que permite recortar la malla y obtener las partes necesarias. En la Ilustración 32 se ha extraído el perfil interior del conjunto representado en la Ilustración 30. El archivo generado puede procesarse fácilmente, exportando los datos de la nube de puntos para una posterior comparación, tal y como se realizará en las próximas secciones.

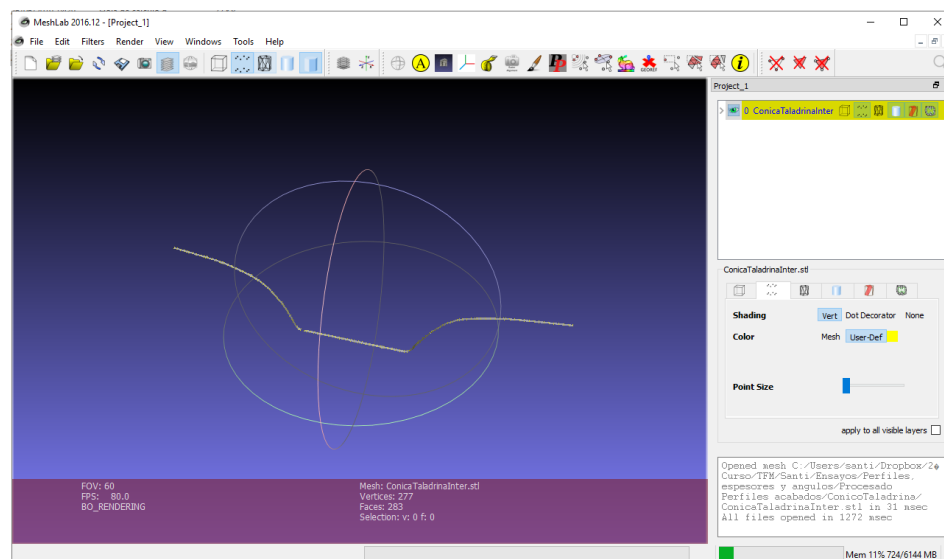


Ilustración 32. Perfil interior recortado mediante "MeshLab".

El espesor y el ángulo de conformado se calcularán punto a punto realizando una serie de operaciones. En el caso del espesor, se calculará para cada uno de los puntos del perfil interior la distancia existente entre el punto indicado y cada uno de los puntos del perfil exterior, seleccionando la mínima distancia como el espesor en ese punto.

El ángulo de conformado (ϕ) se calculará fácilmente, para cada uno de los puntos del perfil interior, haciendo uso de las indicaciones establecidas en artículos mencionados anteriormente (Tisza, 2012) y trigonometría, estableciendo como punto de referencia el origen del radio de curvatura de la trayectoria como puede verse en la Ilustración 33.

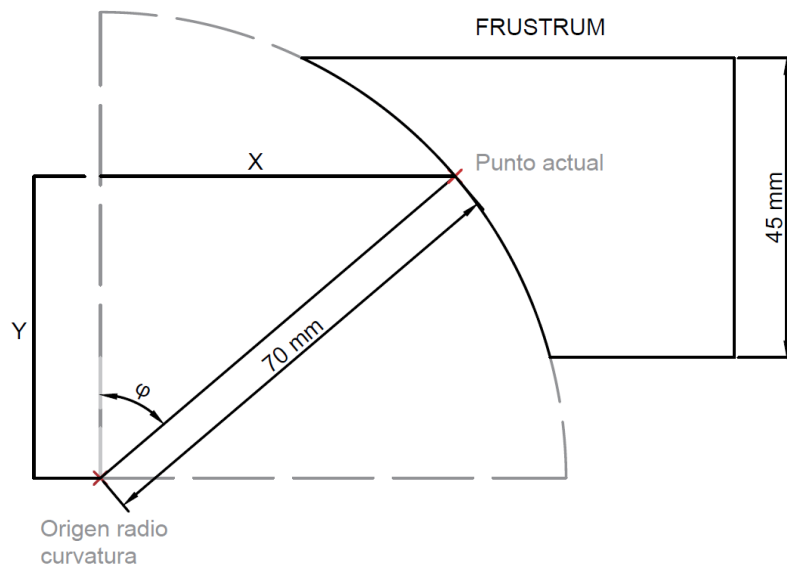


Ilustración 33. Esquema cálculo ángulo de conformado.

5. Resultados experimentales

Tras la realización de los ensayos, se expondrán los resultados obtenidos analizándose para dar paso al diseño de los siguientes ensayos con el fin de completar el estudio.

Los parámetros relevantes para cada uno de estos ensayos son: la fuerza ejercida por el punzón a la lámina del material a deformar, el desgaste producido en la herramienta, la formabilidad obtenida y cómo influye la herramienta en esta y los problemas generados mediante y tras los ensayos.

5.1. Ensayos iniciales

En esta primera tanda de ensayos, se realizarán los 4 casos especificados en el punto 2.2.1. Factores a estudiar.

5.1.1. Fuerzas

La obtención de fuerzas se obtiene gracias al dinamómetro, tal y como se ha indicado anteriormente. Las fuerzas obtenidas son las respectivas a los tres ejes de coordenadas y, a partir del ordenador auxiliar, se recopilan de manera muy cómoda.

El dinamómetro genera un archivo “.txt” con las fuerzas registradas, tiene una tasa de registro de 20 datos por segundo, debido a esto el tratamiento de datos puede ser demasiado tedioso. El procesado de datos se realizará mediante la generación de un código en Matlab, ya que con un mismo código se puede realizar el procesamiento de todos los ensayos solamente con la introducción del nombre del archivo.

La función del código de Matlab es leer los datos del archivo generado por el dinamómetro, eliminar las mediciones antes de la ejecución del ensayo y las finales, dejando solo las relevantes para el estudio. Una vez depurados los datos, gráfica la fuerza en el eje Z, el módulo de las fuerzas en el eje X e Y frente al tiempo y, esta última, debido a la gran cantidad de ruido, la filtrará para facilitar su lectura y comparación.

Aunque todos los ensayos realicen el mismo recorrido y tengan el mismo código ISO, los tiempos de ejecución son distintos debido a las roturas de las puntas, siendo este momento el considerado final de ensayo.

La manera con la que se abarcará este apartado será en primer lugar representar las puntas de la misma geometría por separado dependiendo de la lubricación para finalmente dar paso a una gráfica final donde se recopilen los cuatro ensayos realizados para ver de forma más genérica los resultados.

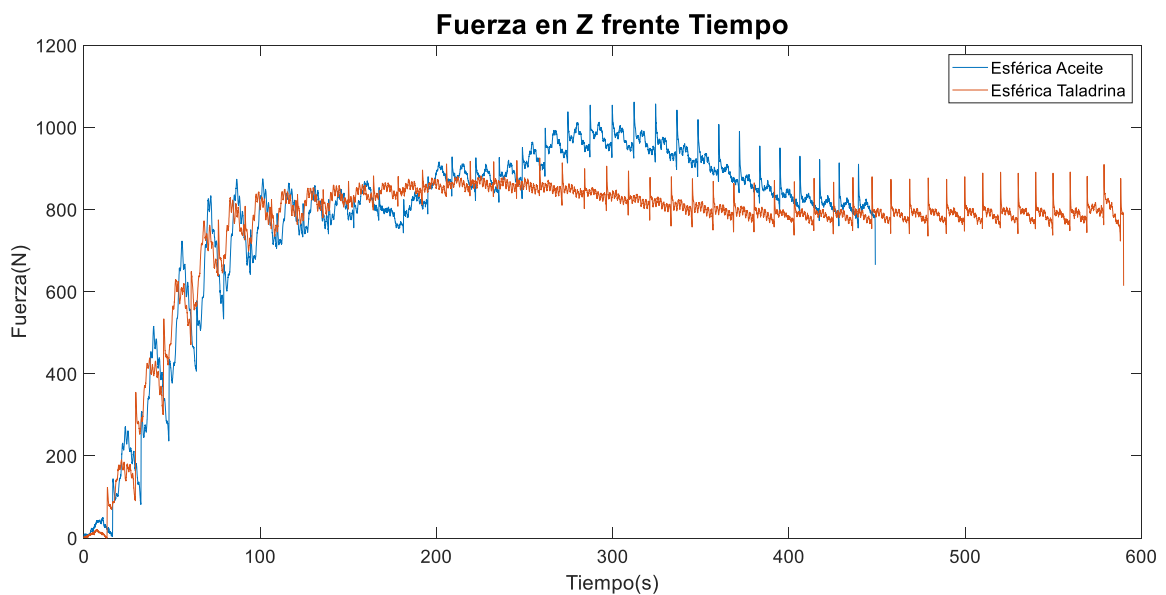


Ilustración 34. Gráfica Fuerza Z frente Tiempo → Punta esférica.

En la Ilustración 34, se puede apreciar que, mediante la punta esférica, no importa cuál sea su lubricación, el inicio de la fuerza sigue la misma tendencia hasta que comienza a estabilizarse y, finalmente, hasta su rotura. En el ensayo con taladrina se observa que la rotura se produce a mayor profundidad, esto era de esperar, ya que, la taladrina aparte de lubricar también refrigera, es decir, mantiene la integridad del material.

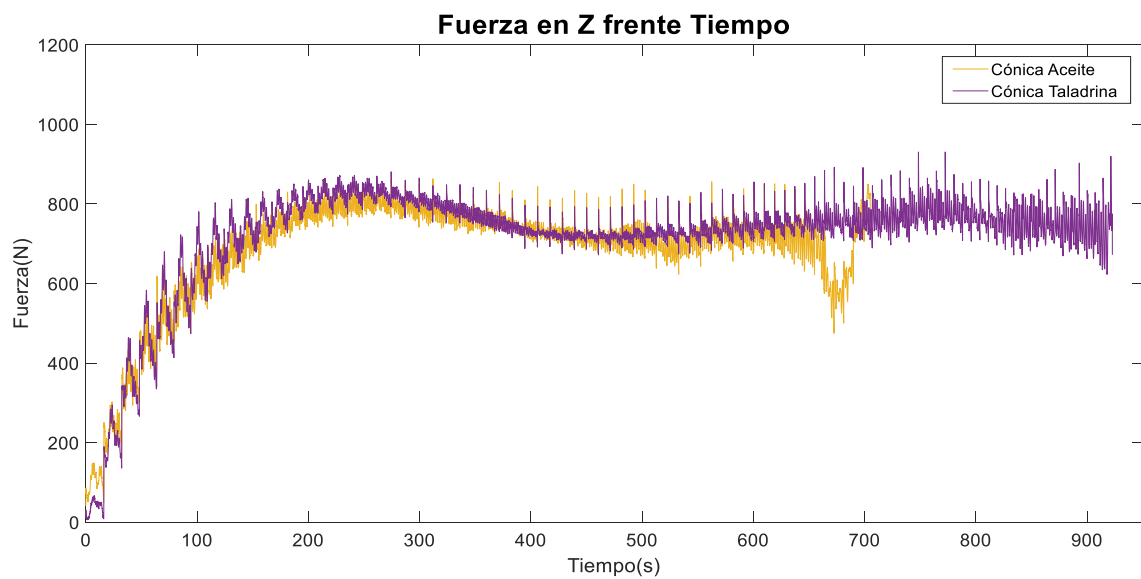


Ilustración 35. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Puntas Cónicas.

En el caso de la punta cónica, sucede igual. Las fuerzas son similares y siguen la misma tendencia hasta la rotura que, para el caso de la taladrina, es a más profundidad. En este caso, la fuerza máxima es levemente inferior que, empleando la punta esférica, esto se puede apreciar en la Ilustración 36. Además, el uso de una forma cónica alarga la vida de la herramienta retrasando su rotura y, por lo tanto, obteniendo una mayor profundidad.

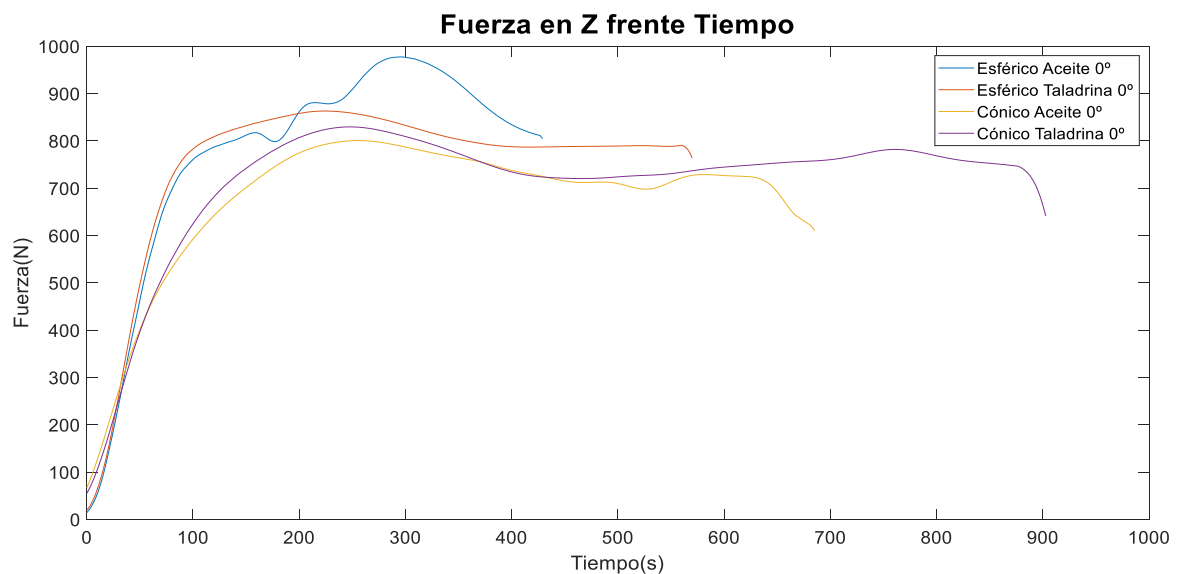


Ilustración 36. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo.

A continuación, se representará el módulo de la fuerza XY frente al tiempo, se ha decidido representar esta fuerza en lugar de la tangencial o radial debido a la complejidad de cálculo de estas. Para obtener un buen cálculo de estas fuerzas, se necesita poder asemejar cada posición de la herramienta con el tiempo correspondiente (Ilustración 37), lo que es demasiado complejo para el caso de la trayectoria seguida.

Aclarado el uso de esta representación, gracias a esta fuerza se podrá conocer cual podrá ser el límite resistente de las puntas antes de producirse la cizalladura o por el motivo que se lleva a cabo. Debido a la gran cantidad de datos recopilados y a la tolerancia de la mesa, se obtiene mucho ruido en las medidas impidiendo la lectura de estos, para mejorar esta lectura se han filtrado los datos, suavizando la curva y, así, permitiendo la obtención de conclusiones y comparaciones.

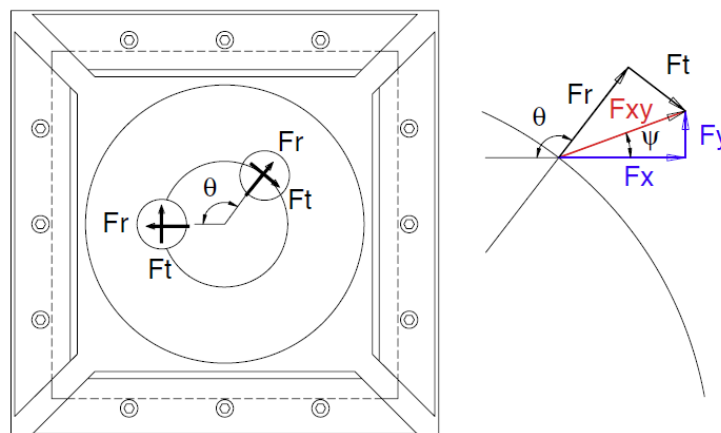


Ilustración 37. Disposición de Fuerzas según posición (Fuente: (Aerens, Eyckens, Van Bael, & Dufflou, 2009)).

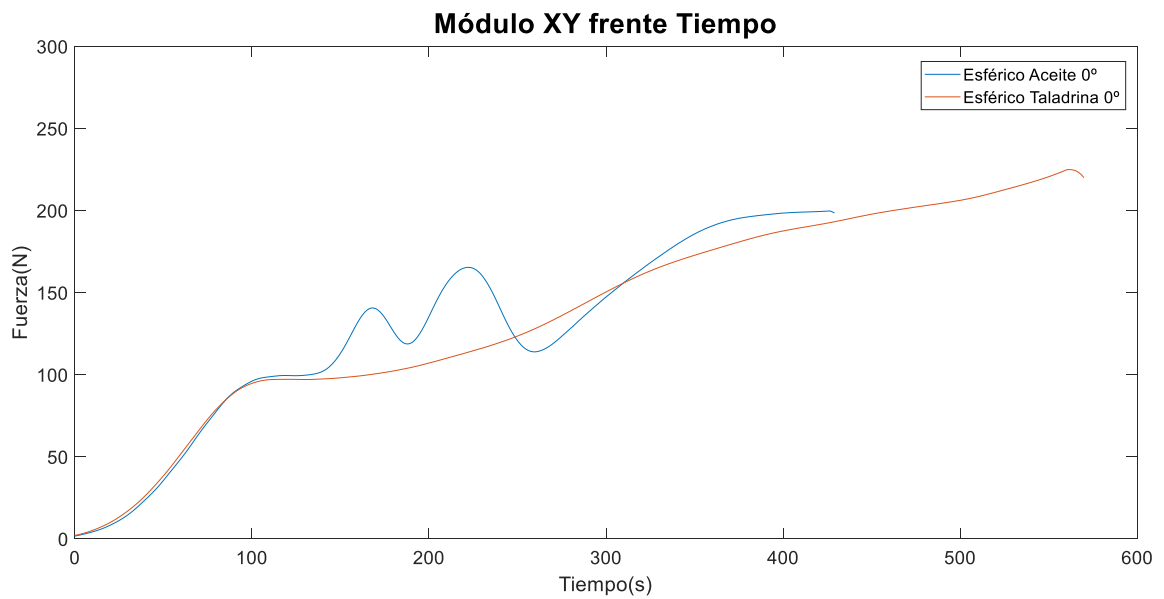


Ilustración 38. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta esférica.

En la Ilustración 38, la fuerza ejercida perpendicularmente a la pieza se puede ver que es directamente proporcional con la profundidad. Como se ha comentado anteriormente, mediante la lubricación por taladrina se realiza mayor refrigeración, favoreciendo la profundidad a alcanzar.

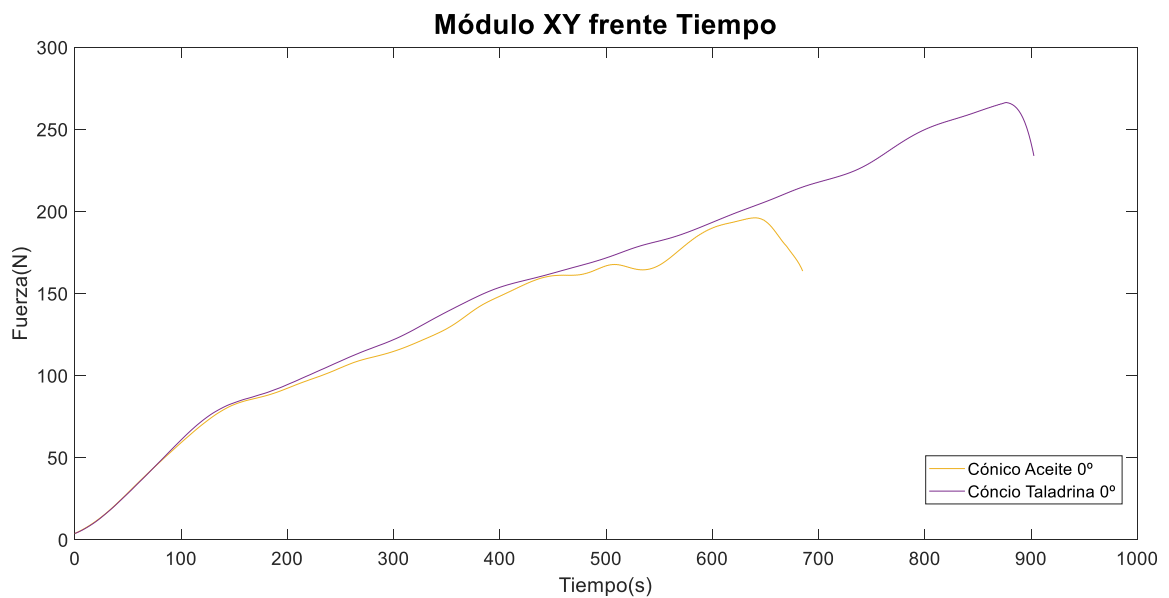


Ilustración 39. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta Cónica.

En el caso de la punta cónica, sucede igual la fuerza es directamente proporcional a la profundidad o al tiempo transcurrido en el proceso y, gracias a la lubricación por taladrina se obtienen mayores profundidades o tiempos más prolongados de trabajo.

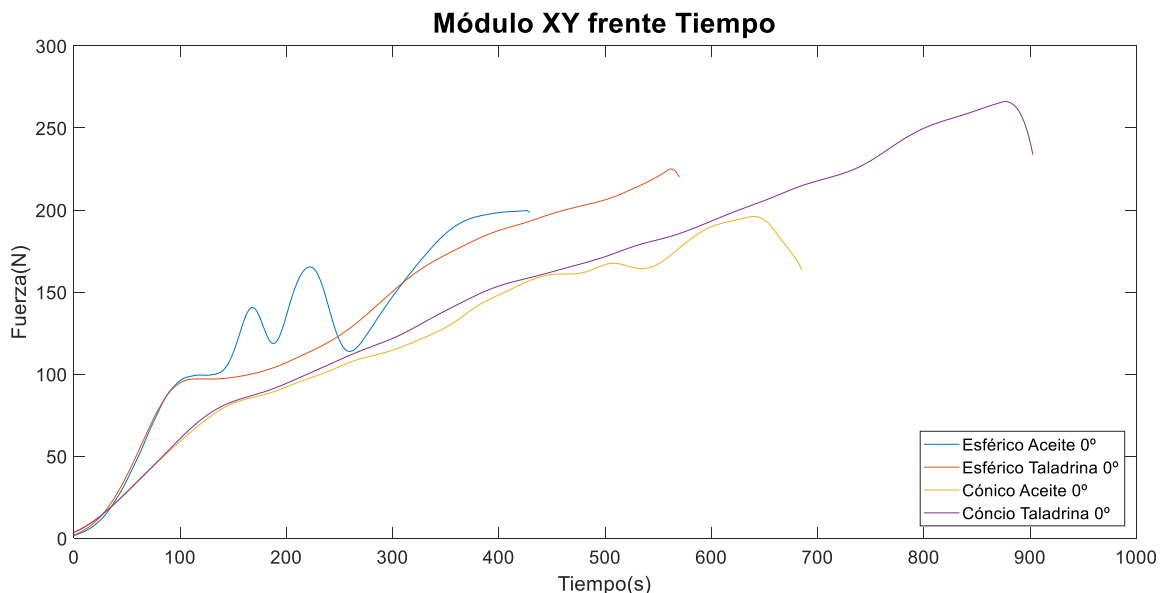


Ilustración 40. Gráfica Módulo XY frente Tiempo.

Finalmente, al comparar ambas lubricaciones se puede concluir que, para ambos casos, utilizando taladrina se puede alargar la vida útil de la punta de PLA reforzado gracias al mantenimiento de las propiedades al no aumentar la temperatura en exceso, aunque en ningún caso son capaces de acabar el proceso. Utilizando puntas cónicas, debido a la necesidad de una menor área de contacto, las fuerzas necesarias para el desplazamiento horizontal son menores.

Respecto a la rotura producida del punzón, son varios los factores que intervienen en este proceso. En primer lugar, puede estar debido a una combinación de fatiga debido a los movimientos de la herramienta y las fuerzas perpendiculares aplicadas al punzón. Otro motivo que agrava el caso anterior sería la presencia de algún defecto, lo cual, es muy probable debido al proceso de fabricación de las puntas. Las puntas se obtienen gracias a una impresora 3D que calienta un filamento y forma la pieza, en este calentamiento pueden modificarse las propiedades y al ser un método

de adición de material siempre puede existir la posibilidad de formación de burbujas, escoria, mala fijación entre capas, mala refrigeración en el proceso que provoca deformaciones de forma, entre otros.

En conclusión, la suma de todos estos efectos más la forma de la punta que afecta al área de contacto y, por lo tanto, el rozamiento de esta área frente a la lámina hace que no se puedan aplicar fuerzas mayores a 200N y 300 N sin provocar cizalladura.

5.1.2. Profundidad generada en la muestra

En la Tabla 3. Profundidad muestra → Puntas inclinación 0°.

, se muestra las profundidades alcanzadas en cada uno de los ensayos de manera teórica, es decir, la profundidad alcanzada por la herramienta siguiendo la trayectoria desarrollada y la profundidad real obtenida, es la generada realmente en la muestra tras las correspondientes deformaciones y recuperaciones elásticas.

Ensayo	Punta		Lubricación		Profundidad teórica (mm)	Profundidad real (mm)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina		
1					30,5	17,96
2					41	36,42
3					17	11,12
4					24	20,26

Tabla 3. Profundidad muestra → Puntas inclinación 0°.

Tal y como se ha demostrado anteriormente, mediante la lubricación a base de taladrina se pueden obtener mayores profundidades debido al aumento de la refrigeración y la reducción del desgaste de la herramienta. Por otro lado, la geometría de la herramienta juega un importante rol en este estudio, ya que, mediante la punta cónica, al reducir el área de contacto entre herramienta y lámina, permite la obtención de mayores profundidades.

La profundidad real generada viene limitada por dos factores, el desgaste de la herramienta y la recuperación elástica del material base, es decir, si la herramienta sufre una gran degradación, la profundidad real que

se obtendrá se verá reducida en proporción al desgaste de esta, en cambio al finalizar la deformación, la lámina tenderá a la recuperación elástica, siempre y cuando, no se supere el límite elástico pasando a una deformación plástica.

En la Tabla 4. Error generado en la profundidad.

, se puede apreciar el porcentaje de error o desviación obtenida en cada uno de los ensayos, teniendo en cuenta los factores indicados.

Ensayo	Punta		Lubricación		Desviación (%)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina	
1					41,11
2					11,17
3					34,59
4					15,58

Tabla 4. Error generado en la profundidad.

En conclusión, mediante la utilización de taladrina se reduce el desgaste de la herramienta y, por lo tanto, se reduce el error cometido entre la profundidad real y la teórica hasta el momento de la rotura del punzón.

5.1.3. Desgaste herramienta

En el estudio del desgaste de la herramienta, se han tenido en cuenta dos factores, la altura y el peso final del punzón. A partir de los datos obtenidos, se podrá fijar o estudiar la pérdida de material o desgaste producido en la herramienta tras el conformado desarrollado.

Los datos obtenidos se han recopilado en la siguiente Tabla 5. Pesos y Alturas obtenidas con puntas impresas 0° de inclinación.

, donde se puede apreciar, a simple vista, que el peso final de la herramienta no tiene grandes oscilaciones debido a que el material desgastado apenas se desprende de la punta, quedando apilado en esta. Respecto a la altura, si se pueden observar grandes cambios entre la lubricación y la geometría empleada.

Ensayo	Pesos (g)		Altura (mm)	
	Cónica	Esférica	Cónica	Esférica
Aceite	0,81	0,45	7,24	4,94
Taladrina	0,82	0,47	10	6,26
Sin deformar	0,83	0,49	16	7

Tabla 5. Pesos y Alturas obtenidas con puntas impresas 0° de inclinación.

Como era de esperar y como se ha comentado ya en varias secciones anteriores, el uso de taladrina favorece simultáneamente el deslizamiento de la herramienta y su refrigeración. Al poder deslizarse con mayor facilidad y siendo un elemento más estable, ya que, no se debilita por el efecto del calor generado, se mejora su resistencia al desgaste. Para apreciar mejor estos valores, se representará, en la Ilustración 41 e Ilustración 42, el porcentaje de desgaste frente a los distintos ensayos.

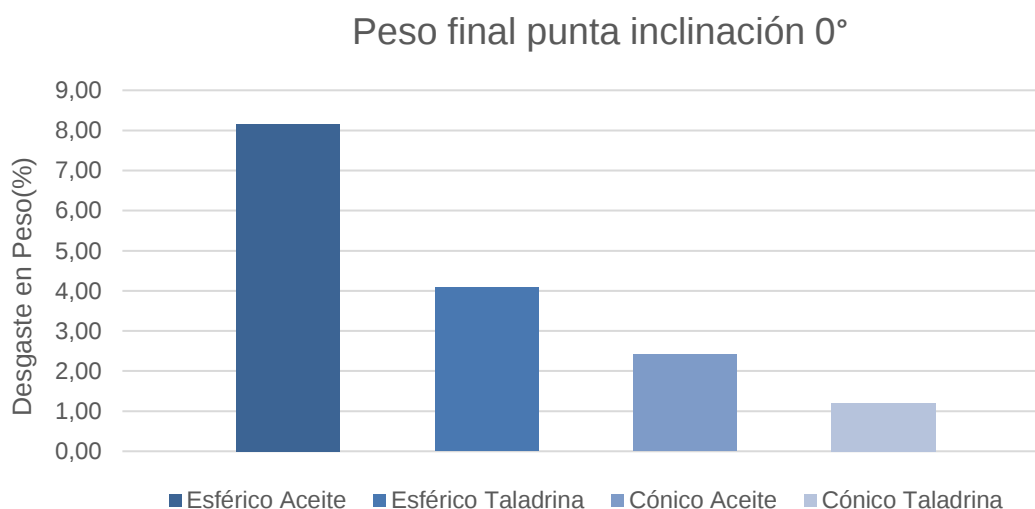


Ilustración 41. Pesos finales puntas inclinación 0°.

En la Ilustración 41, se muestra el porcentaje de peso perdido, donde la geometría cónica obtiene valores más reducidos desprendiendo menos cantidad de material de la punta, en cambio para determinar el desgaste total de cada una de las puntas se tienen que estudiar las alturas finales de las puntas.

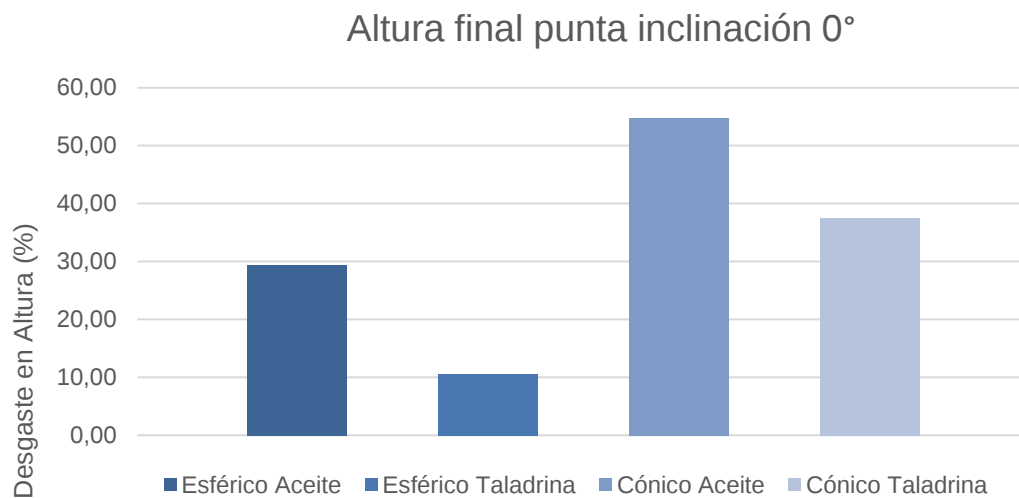


Ilustración 42. Alturas finales puntas inclinación 0°.

Respecto a las alturas finales, las puntas esféricas tienen menos porcentaje de pérdida, esto puede estar debido a que las puntas cónicas al inicio son más esbeltas por lo que se desgastan con mayor rapidez y facilidad. Una vez se desgasta la punta esbelta se frena la caída de altura.

En ambos casos, el uso de taladrina como lubricante reduce tanto la pérdida de material como la disminución en la altura, sin embargo, la utilización de aceite produce un calentamiento en la punta de PLA que favorece el desgaste mediante pérdida de material como puede apreciarse en la Ilustración 41 y, por lo tanto, una mayor disminución en la altura final de la punta, alcanzando valores del 30% al 50% de pérdida de altura.

5.1.4. Ángulos de inclinación y evolución del espesor

Siguiendo las pautas desarrolladas en la sección 4.4.3. Perfil, espesor y ángulo de conformado, se ha calculado la evolución del espesor y del ángulo de inclinación para cada uno de los ensayos con la finalidad de poder compararlos posteriormente. Gracias al desarrollo de un código en Matlab esta extracción de gráficas y datos se ha automatizado obteniendo los resultados que se comentan a continuación.

En primer lugar, se van a mostrar los datos obtenidos en los ensayos con las puntas esféricas, tanto lubricación de aceite como taladrina. A

continuación, se representarán los datos obtenidos para las puntas cónicas y, finalmente, se representarán todos los datos junto a una tabla comparativa, con el fin de poder comparar a simple vista los resultados.

En la Ilustración 43, se aprecia que los ángulos de inclinación obtenidos siguen la misma tendencia, es decir, evolucionan de igual manera que el perfil teórico esférico, el perfil teórico tanto para el caso de puntas esféricas como cónicas se ha calculado teniendo en cuenta la desviación producida por el diámetro de la herramienta en la trayectoria.

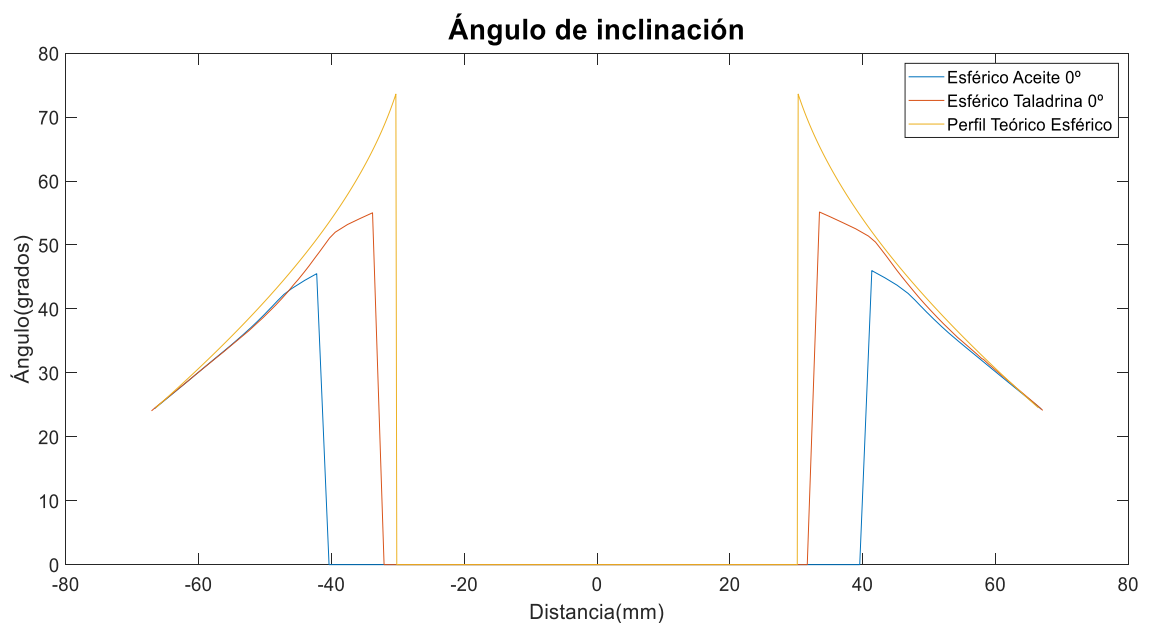


Ilustración 43. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Esférica 0°.

Respecto a los datos obtenidos, los ángulos obtenidos siguen la misma trayectoria que el perfil teórico, pero, la rotura de la punta hace que no se finalice el ensayo impidiendo alcanzar mayores ángulos de conformado. En términos de lubricación, el uso de taladrina permite la obtención de mayores ángulos de conformado para el PVC.

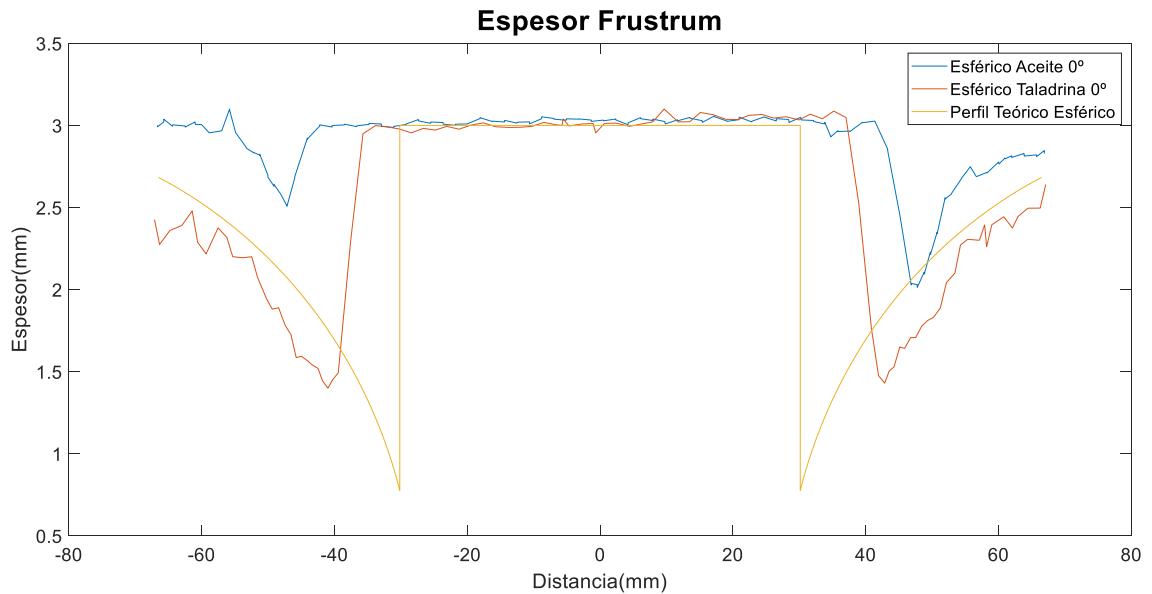


Ilustración 44. Gráfica evolución del espesor → Punta Esférica 0°.

La evolución del espesor se ve agravada respecto a la teórica, alcanzando menores espesores respecto a lo esperado teóricamente con el uso de taladrina. A partir del uso de aceite no se llegan a alcanzar estos valores teóricos, ya que la punta no es capaz de soportar las fuerzas ejercidas. Aunque la evolución de los espesores sobrepase el espesor teórico, la tendencia de este es similar.

A continuación, en el caso de las puntas cónicas puede verse que ocurre de igual forma, aunque en este caso al soportar las puntas mayores profundidades, los ángulos alcanzados son muy similares a los teóricos. En el caso de lubricación por taladrina, se aprecia que aumenta la integridad de la punta y, por lo tanto, alcanzando mayores ángulos de pared. En este caso, se alcanza un ángulo máximo de inclinación de la pared de $67,48^\circ$.

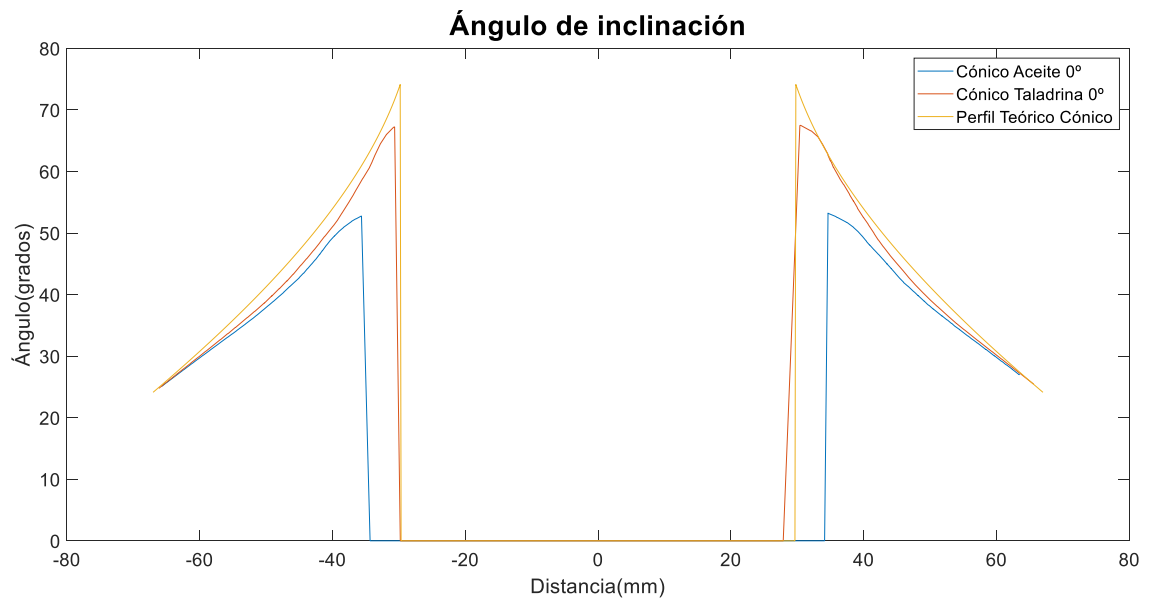


Ilustración 45. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Cónica 0°.

En la Ilustración 46 se representa la evolución del espesor. Los espesores alcanzados sufren menos variaciones, es decir, no alcanzan valores tan bajos lo que supone mayor estabilidad en el material impidiendo el fallo por rotura. Respecto a la tendencia del espesor, puede apreciarse que es similar a la teórica, la diferencia es que no se alcanzan valores tan bajos, lo que favorece la integridad del proceso.

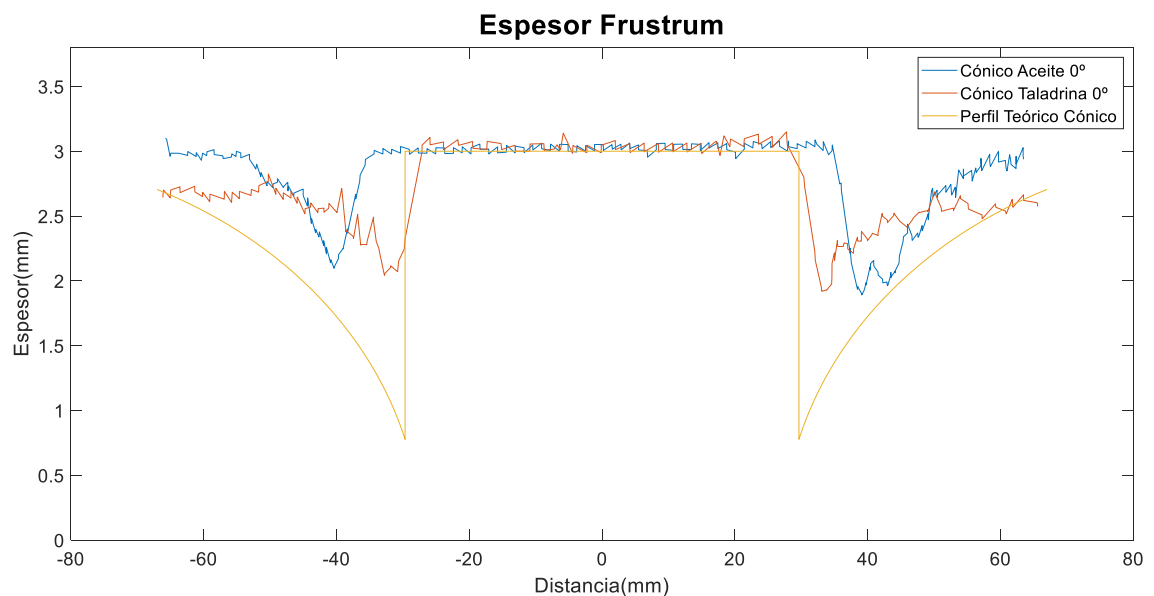


Ilustración 46. Gráfica evolución del espesor → Punta Cónica 0°.

Finalmente, con objeto de realizar una comparación global de los resultados obtenidos en el proceso de conformado incremental monopunto con puntas de PLA reforzado con fibra de carbono impreso con una inclinación de capa de 0° , se han expuesto los resultados en las siguientes gráficas y tablas.

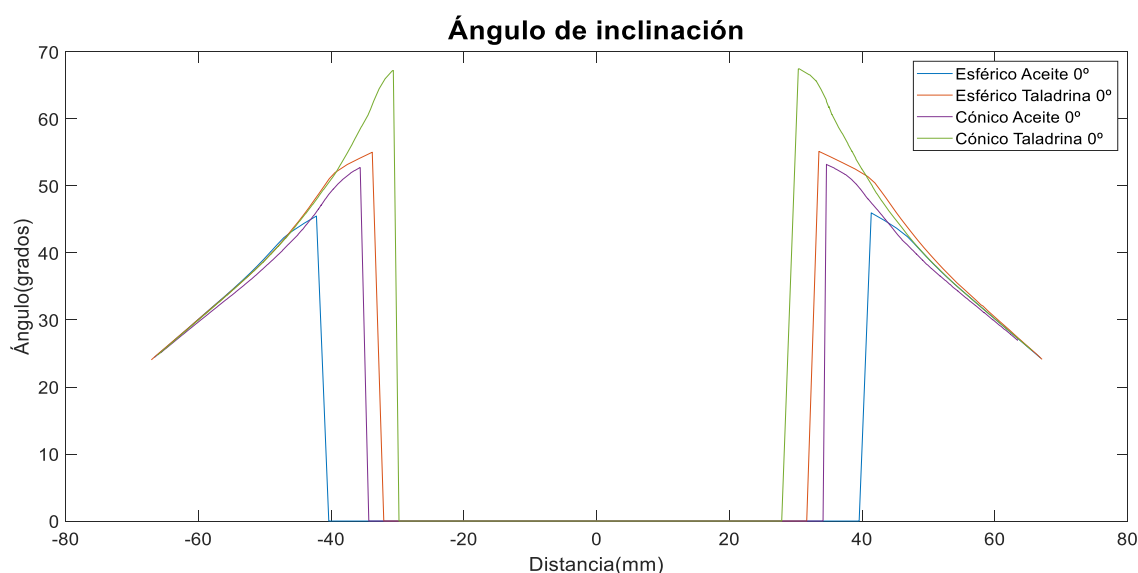


Ilustración 47. Gráfica ángulo de inclinación → Comparativa puntas 0° .

En la Ilustración 47, se observa que de igual forma que ocurría en las fuerzas al alcanzar mayores profundidades antes de producirse la rotura, la inclinación será mayor ya que se va acercando cada vez más a su geometría final, en este caso, mediante el uso de una punta cónica y lubricación por taladrina se obtienen mayores ángulos de pared cercanos a los ángulos máximos de rotura del PVC, que en estudios anteriores (González, 2015) se ha comprobado que es 66° , en cambio, como se muestra en la Tabla 6, haciendo uso de la combinación indicada se supera levemente esta inclinación.

Ensayo	Punta		Lubricación		Inclinación máxima alcanzada(grados)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina	
1					53,23
2					67,48
3					45,99
4					55,16

Tabla 6. Inclinación máxima → Puntas inclinación 0° .

Respecto a la comparación en la evolución del espesor a medida que se incrementa la profundidad, todos los resultados siguen la misma tendencia y alcanzan valores similares, excepto para el caso de punta esférica lubricada con taladrina, donde los resultados de la deformación se disparan y se alcanzan espesores de pared más bajos.

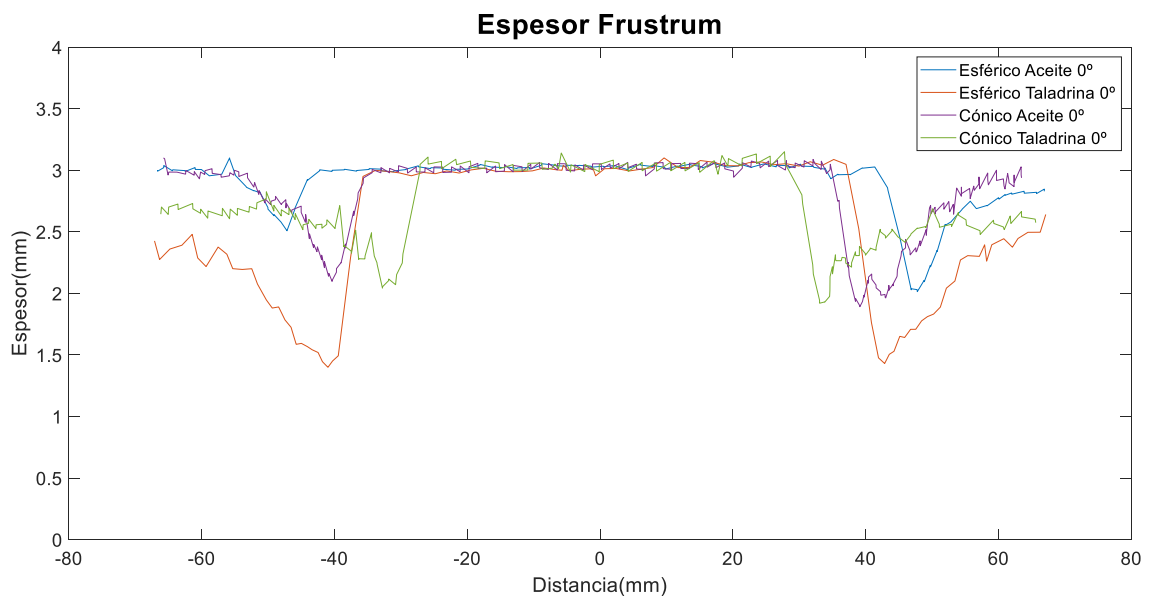


Ilustración 48. Gráfica evolución del espesor → Comparativa puntas 0°.

5.1.5. Perfil desarrollado

En esta sección se estudiará los perfiles desarrollados tras la deformación, comparando los resultados con el perfil teórico de la geometría esperada.

En la representación de los datos se seguirá el mismo criterio que en las secciones anteriores para la muestra de resultados con el fin de poder comparar y localizar las secciones con una mayor precisión.

En primer lugar, se compararán los resultados obtenidos para la punta esférica y las distintas configuraciones de lubricación, también se representará la geometría del perfil teórico esférico, en la cual se ha tenido en cuenta la posición y diámetro de la herramienta a lo largo de la trayectoria.

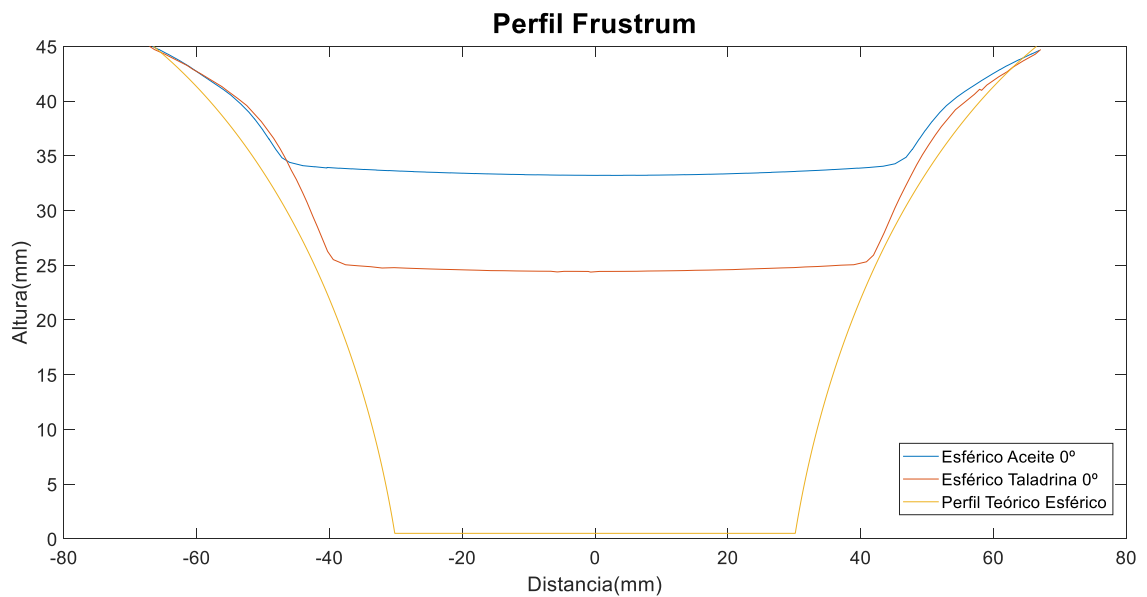


Ilustración 49. Perfil Frustrum → Punta Esférica 0°.

La Ilustración 49 muestra que, mediante el uso de las puntas esféricas la geometría sigue la misma tendencia, aunque por problemas de rotura las profundidades alcanzadas son muy distintas a las que se querían conseguir finalmente. También se aprecia claramente que la lámina sufre una recuperación elástica por lo que el diámetro en la profundidad alcanzada es menor a la teórica. Los perfiles generados en ambos ensayos son similares, produciendo formas similares e igual tendencia.

A continuación, se pueden observar los resultados de las puntas cónicas, que como se intuía, el perfil generado se adapta mejor a la forma teórica que se busca. En la Ilustración 50 se aprecia que usando este tipo de punta el perfil se aproxima a la geometría final que se va buscando, ocurre como en el caso anterior que se produce una pequeña reducción de diámetro debido a la recuperación elástica del material tras el cese de esfuerzos. En este caso, se aprecia a simple vista el efecto de la lubricación debido a que mediante aceite la punta rompe tras las primeras vueltas, en cambio, con taladrina la estabilidad de la punta se mantiene y se puede llegar a profundidades mayores, reproduciendo la geometría esperada.

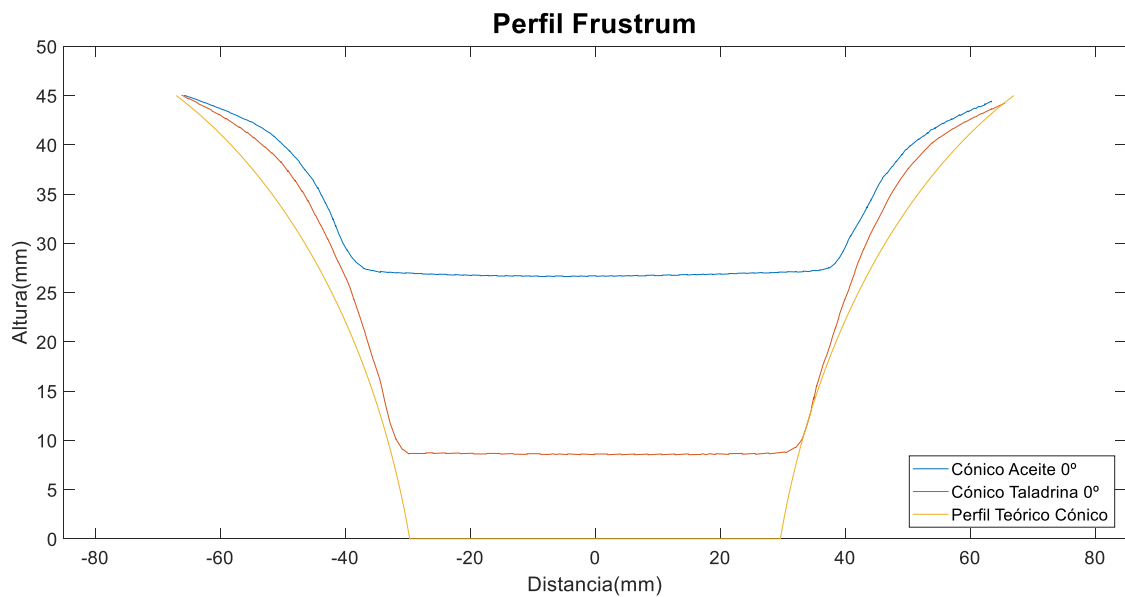


Ilustración 50. Perfil Frustrum → Puntas Cónicas 0°.

En la Ilustración 50 se puede ver como al inicio la forma generada del frustrum tiene una curvatura más pronunciada, esto puede estar debido al efecto del desgaste de la herramienta, ya que al principio se tiende al desgaste de la zona esbelta de la punta cónica y mientras esto se produce la deformación es excesivamente pequeña, una vez se llega a diámetros mayores de herramienta el desgaste se frena notablemente produciendo una mayor deformación al ser esta herramienta más estable. Por este motivo al inicio, la deformación es menor y en la zona pronunciada se produce mayor deformación.

Finalmente, se compararán los resultados mediante una gráfica que abarca todos los casos que se han desarrollado para intentar comprender la geometría seguida durante la deformación y, cual es la combinación más favorable para obtener geometrías más similares a la esperada y ángulos de inclinación mayores.

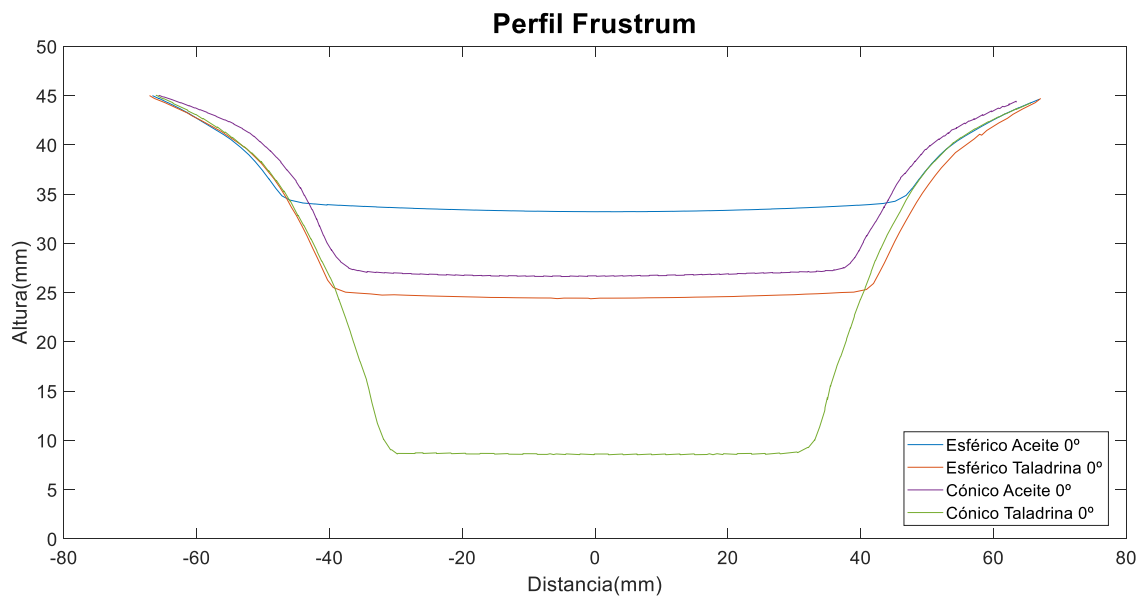


Ilustración 51. Perfil Frustrum → Comparativa puntas 0°.

En la ilustración anterior, se puede apreciar que lo comentado anteriormente va cogiendo forma y tiene sentido. Mediante la punta cónica debido al desgaste excesivo inicial y a la lubricación por aceite se obtienen diámetros menores. En cambio, en ambas geometrías, la lubricación tiene un rol importante, ya que mediante aceite se incrementa el desgaste y el calentamiento de la punta lo que compromete la estabilidad de este, produciendo incrementos de desgastes debido a la debilidad del material e incluso rotura por cizalladura producida por el incremento del área de contacto al incrementar el desgaste.

En conclusión, mediante punta cónica y lubricación con taladrina se obtiene una geometría similar a la teórica con mayores ángulos de inclinación de la pared y mayor profundidad, pero en ningún caso se ha finalizado los ensayos debido a la rotura del punzón durante su ejecución.

5.1.6. Problemática

Tras los resultados obtenidos en esta tanda de ensayos, han surgido una serie de inconvenientes o problemas a la hora de realizar los ensayos. En primer lugar, y el problema más importante es la rotura de la punta del punzón antes de finalizar el proceso, esto supone introducir una serie de

cambios en la realización de los ensayos para intentar paliar esta problemática.

La rotura del punzón es producida por un cúmulo de factores como las imperfecciones en la pieza debido al método de obtención de esta. La fabricación por adición de material, como es el caso de la impresión 3D, tiene una serie de ventajas, pero también introduce una serie de inconvenientes a la hora del uso de estas puntas. La integridad de las puntas se puede ver afectada por la presencia de burbujas o impurezas introducidas en la extrusión del plástico, además, el método de unión entre capa y capa puede verse afectado por condiciones muy complejas de controlar como la refrigeración, la viscosidad del plástico o la presión ejercida en un punto determinado. Estos factores agravan la separación de las capas en un momento concreto del ensayo. El problema expuesto se podría eliminar haciendo uso de otros métodos, más elaborados y mucho más costosos, en la obtención de las puntas, pero debido al coste y tiempo necesarios se propone un cambio de orientación en las capas, incrementando el número de capas en la sección donde se produce la rotura, que favorecerá la resistencia a la cizalladura.

Esta solución puede eliminar la rotura en la espiga de las puntas, pero al cambiar la orientación de las capas, la fuerza tangencial y radial se ejercen más perpendiculares a las capas lo que puede producir arrastre de material o un mayor desgaste. En la siguiente tanda de ensayos se tendrá en cuenta esta inclinación y se estudiarán los mismos parámetros con la finalidad de poder establecer un criterio más estable en el uso de este material en un proceso SPIF.

5.2. Ensayos tras resultados iniciales

Concluidos los ensayos iniciales, se genera una problemática que tiene la necesidad de ser solucionada, para intentar solucionar esta rotura o cizalladura de las puntas se plantea una solución. Inicialmente las capas de la impresión eran paralelas a la cama caliente (Ilustración 9) que, a priori, ofrece una facilidad en la impresión, pero en la zona de cambio de sección entre la punta y la espiga, la unión entre capa y capa es muy débil. Esto se puede mejorar cambiando la inclinación de las capas y haciendo que, en esta sección, aumente el número de capas.

Estos ensayos han sido realizados con una inclinación de 45° respecto a la cama caliente (Ilustración 9), tal y como se indica en el apartado correspondiente (2.2.2. Factores a estudiar tras resultados iniciales).

En todas las subsecciones siguientes se seguirá el mismo criterio de representación de resultados que en la sección 5.1. Ensayos iniciales, es decir, se representarán los resultados para puntas esféricas, por un lado, a continuación, las puntas cónicas y, finalmente, los ensayos realizados tanto para puntas esféricas como para cónicas.

5.2.1. Fuerzas

Respecto a las fuerzas obtenidas en los ensayos anteriores, a priori, se estima que se alcanzará mayor profundidad haciendo uso de estas nuevas puntas, esto dará una visión y pautas a la hora de poner en práctica el conformado incremental monopunto con estas herramientas. A continuación, se analizarán los resultados obtenidos y, así, se comprobará si, en efecto, se cumplen las anteriores hipótesis.

Al representar la fuerza en el eje Z frente al tiempo que se emplea en realizar el ensayo, en la Ilustración 52 se comprueba que ocurre de igual manera que con las puntas esféricas impresas a 0° . Al principio se incrementa la fuerza de manera muy rápida para dar paso a una estabilización en esta fuerza hasta que se produce la rotura debido a las fuerzas ejercidas tangencial y radial a la punta de la herramienta.

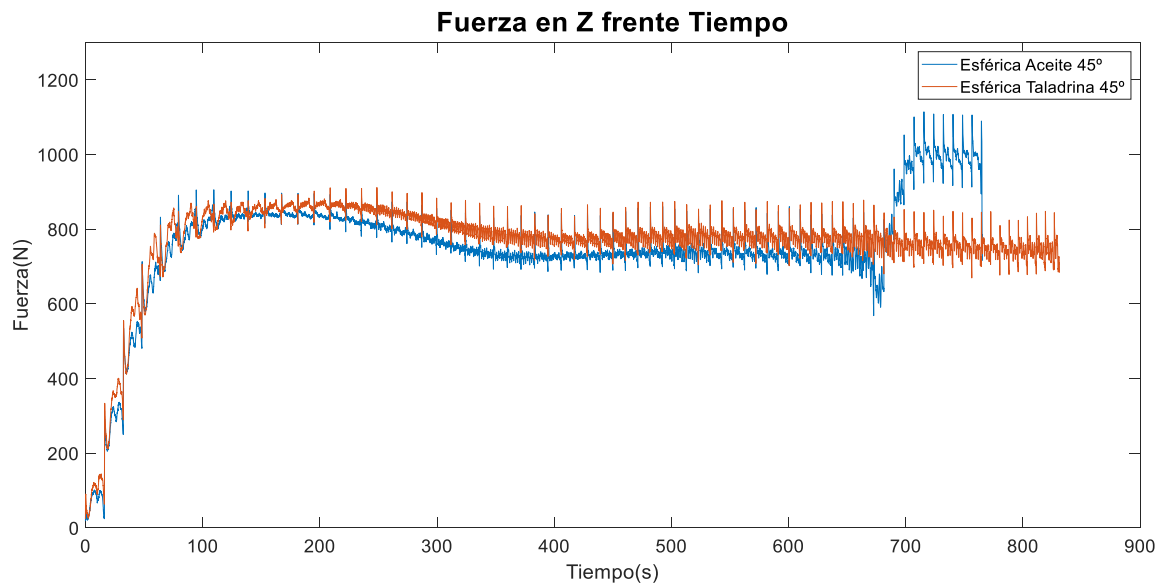


Ilustración 52. Gráfica Fuerza Z frente Tiempo → Punta esférica 45°.

De igual manera, ocurre con la punta cónica, donde se produce de nuevo la tendencia creciente para luego dar paso a una estabilización de la fuerza. Para el caso “Cónica Aceite 45°” se ve una pequeña alteración en la zona estable, esto ha sido provocado por el desprendimiento o desgaste excesivo de la punta por lo que la fuerza en ese momento de desgaste o desprendimiento de material se ve afectada con una reducción.

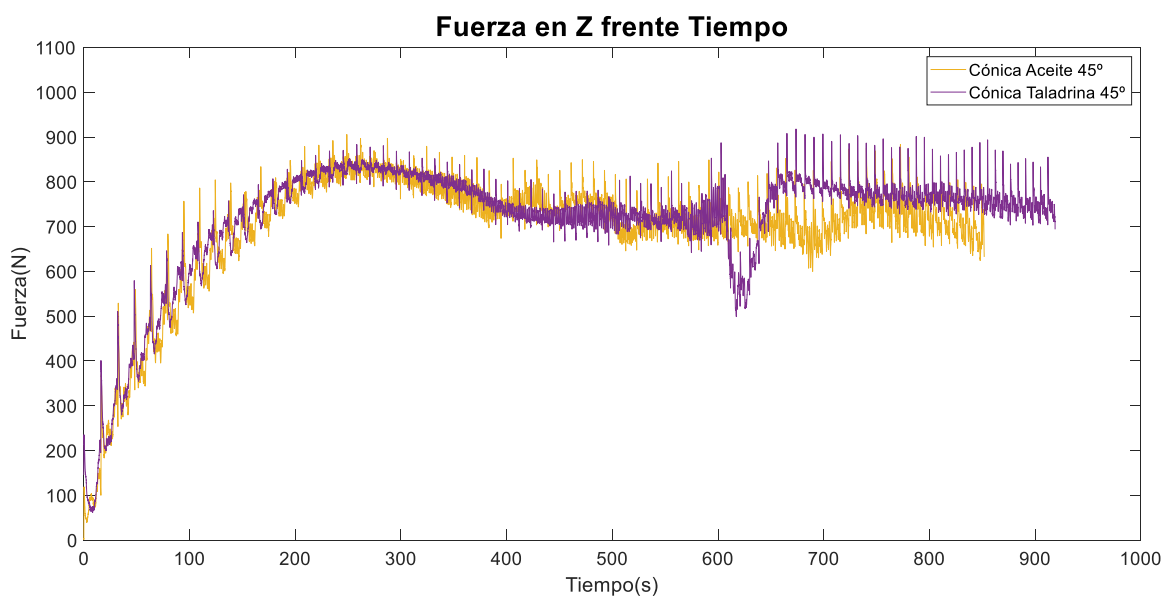


Ilustración 53. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Punta Cónica 45°.

En la Ilustración 54, se puede comparar estos 4 ensayos a simple vista, para mejorar esta comparación se ha eliminado el ruido generado por el dinamómetro suavizando las gráficas a partir de un filtro gaussiano, con el cuál la gráfica queda más limpia e intuitiva.

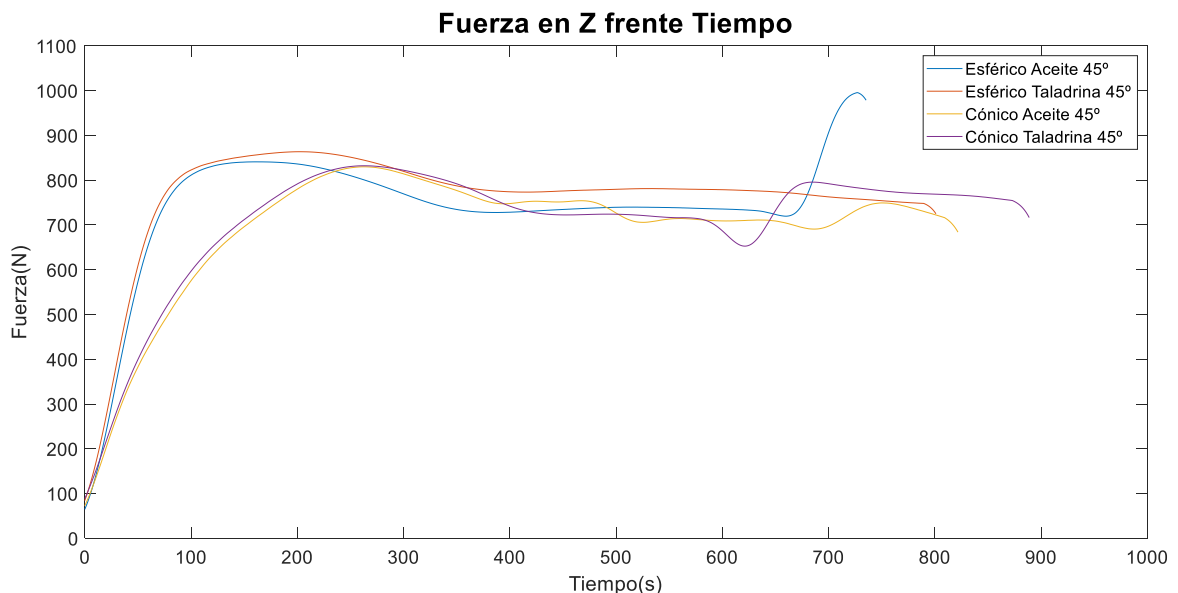


Ilustración 54. Gráfica Fuerza en Z frente Tiempo → Puntas 45°.

Se puede ver como las fuerzas máximas obtenidas en el tramo estable son similares y siguen la misma tendencia, no existiendo gran diferencia entre el uso de aceite o taladrina. La gran diferencia entre el uso de un tipo de punzón u otro es la pendiente con la que aumenta la fuerza en el eje Z. El uso de puntas cónicas reduce la pendiente con la que asciende la fuerza en Z, debido que al inicio del proceso la punta cónica tiene un área de contacto muy reducida, es decir, la punta del punzón es muy esbelta y, por este motivo, se produce un desgaste mayor traducido como una reducción en la pendiente.

Otra característica a resaltar en esta comparación es la similitud en el aumento de la fuerza en Z independientemente de la lubricación empleada, es decir, el factor predominante en este caso es la geometría del punzón.

A continuación, se representará la evolución del módulo XY a lo largo del tiempo, debido a las oscilaciones y ruido generado por el dinamómetro

en estas medidas se ha aplicado, como en el caso anterior, un filtro gaussiano con el que se suavizan las gráficas permitiendo leerlas de manera más rápida y sencilla.

En el primer caso, empleando la punta esférica, se observa que en ambos casos sigue la misma tendencia hasta llegar al punto que comienza a hacer efecto el calentamiento de la punta que incrementa el desgaste o el desprendimiento de material. Esto explica la reducción del módulo hasta que aumenta el área de contacto y comienzan a incrementarse las fuerzas ejercidas hasta valores que la punta no es capaz de soportar, produciendo la rotura de esta. En cambio, mediante lubricación por taladrina la temperatura de la punta está controlada, produciéndose el desgaste propio de la fricción que aumenta el área de contacto, esto se traduce con un aumento continuo, Ilustración 55, hasta producirse la rotura del punzón por alcanzar valores insoportables por la punta o por efecto de fatiga.

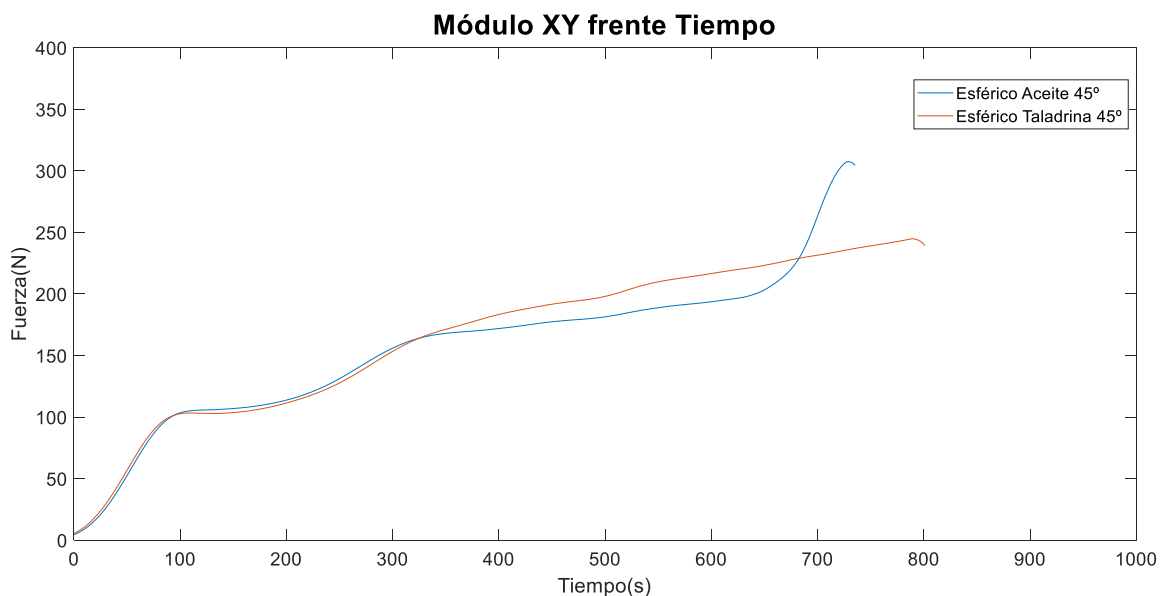


Ilustración 55. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta esférica 45°.

En el caso de la punta cónica, sucede igual, ambas siguen la misma tendencia y, como se ha comentado anteriormente, la punta con lubricación de aceite se calienta y se desgasta con mayor facilidad produciendo el mismo efecto.

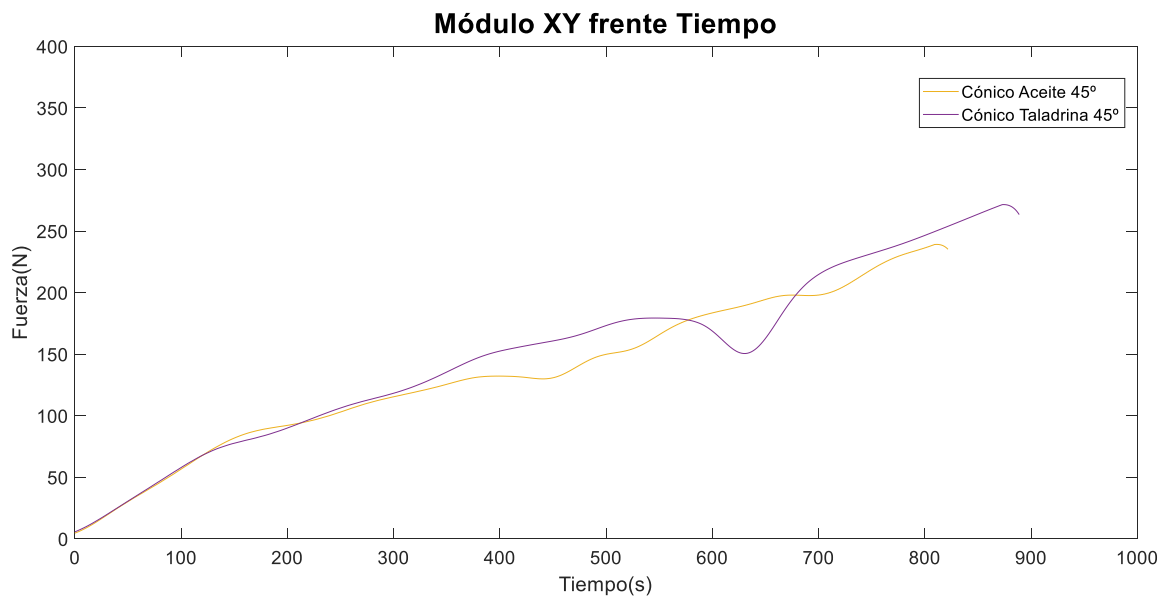


Ilustración 56. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Punta Cónica 45°.

Finalmente, se realizará la comparación de los cuatro ensayos realizados con el fin de sacar algún factor relevante en el proceso.

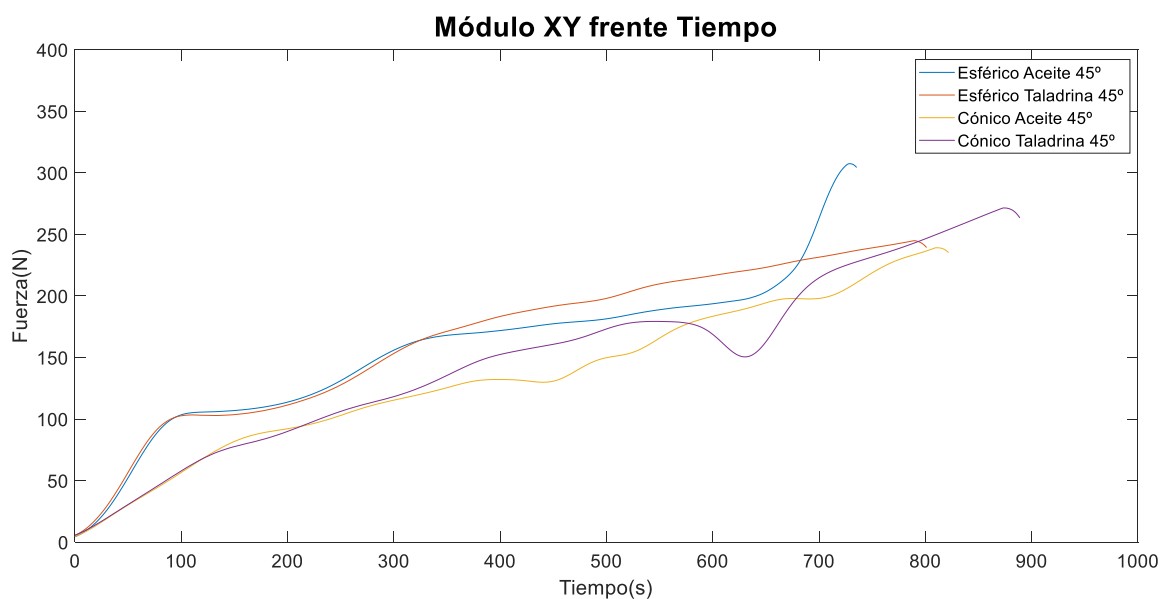


Ilustración 57. Gráfica Módulo XY frente Tiempo → Puntas 45°.

Tal y como se veía en la fuerza en Z, en este caso se puede apreciar como para la punta esférica se obtienen mayores fuerzas, esto es debido, principalmente, a el área de contacto, ya que a mayor área de contacto mayor es el esfuerzo que se debe superar para realizar el movimiento. Se ve claramente como el punzón cónico al ser más esbelto necesita ejercer

menor fuerza para su traslación, pero a medida que el punzón se va desgastando se necesita incrementar esta fuerza. Esta disminución en las fuerzas durante el proceso permite que se alcance un mayor porcentaje de la trayectoria a seguir antes de producir la rotura o incluso terminar el proceso como sucede con el punzón cónico y lubricación por taladrina.

En conclusión, en términos de fuerza, el factor más importante en el proceso es la geometría del punzón, la lubricación tiene un papel importante también, ya que usando taladrina la estabilidad de la punta se mejora, permitiendo alcanzar un mayor porcentaje de finalización del proceso, es decir, permite realizar un mayor porcentaje de la trayectoria total a seguir por la maquinaria antes de la rotura.

5.2.2. Profundidad generada en la muestra

En la Tabla 7, se muestran las profundidades alcanzadas por la herramienta en cada uno de los ensayos de manera teórica y real. La teórica se ha podido tomar gracias a la maquinaria que indica el valor de Z en el cual se produce la rotura o finaliza el ensayo, en cambio para la profundidad real se ha empleado el escáner 3D.

Ensayo	Punta		Lubricación		Profundidad (mm)	Profundidad real (mm)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina		
1.1					38	27,61
2.1					45	34,66
3.1					34	27,76
4.1					40	34,86

Tabla 7. Profundidad muestras para puntas de 45°.

Tal y como se demostró en los ensayos anteriores y se ha comentado, mediante una lubricación basada en taladrina se puede incrementar la profundidad alcanzada por la herramienta, en la Tabla 7 se comprueba que en este caso también ocurre.

Con el uso de puntas impresas con una inclinación de 45° se puede apreciar que existe una diferencia entre el uso de puntas con distinta geometría, ya que para puntas cónicas independientemente de la

lubricación que se emplee se alcanzan profundidades teóricas mayores. En cambio, cuando se cotejan con las profundidades reales se puede ver como empleando una geometría u otra se obtienen valores similares, esto puede ser debido al desgaste de la herramienta, ya que en la punta cónica al ser más esbelta es más fácil que se produzca un mayor desgaste hasta alcanzar una geometría similar a la punta esférica, por este motivo se alcanza una mayor profundidad teórica pero la real es similar.

Ensayo	Punta		Lubricación		Desviación (%)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina	
1.1					27,34
2.1					22,98
3.1					18,35
4.1					12,85

Tabla 8. Error generado en la profundidad.

En la Tabla 8, se muestra el error cometido respecto a la profundidad real obtenida y teórica. Aunque las puntas cónicas soporten trayectorias más extensas sin producir rotura, se puede apreciar que se obtiene un mayor error, esto se puede traducir en mayor tiempo de conformado y número de vueltas para obtener el mismo resultado.

La teoría a la que se achaca este error podrá confirmarse en el siguiente punto (5.2.3. Desgaste herramienta), ya que mostrará si finalmente se produce tal desgaste para asemejar geometrías y, por tanto, obtener resultados similares.

5.2.3. Desgaste herramienta

Los datos obtenidos en estos ensayos se han recopilado en la siguiente ilustración, donde se puede apreciar la pérdida de material y altura, tras revisar los datos se verá si lo mencionado anteriormente tiene sentido.

Ensayo	Pesos (g)		Altura (mm)	
	Cónica	Esférica	Cónica	Esférica
Aceite	0,68	0,43	5,72	4,44
Taladrina	0,71	0,45	8,58	6,12
Sin deformar	0,83	0,49	16	7

Tabla 9. Pesos y Alturas obtenidas con puntas impresas 45° de inclinación.

De los datos recogidos en esta tanda de ensayos, cabe resaltar la pérdida de altura en la punta cónica tras el proceso de conformado. Esta pérdida de altura también tiene asociado una pérdida notable de peso. Para apreciar estos datos mejor se han representado dos gráficos de barras donde se puede realizar la comparación en términos porcentuales.

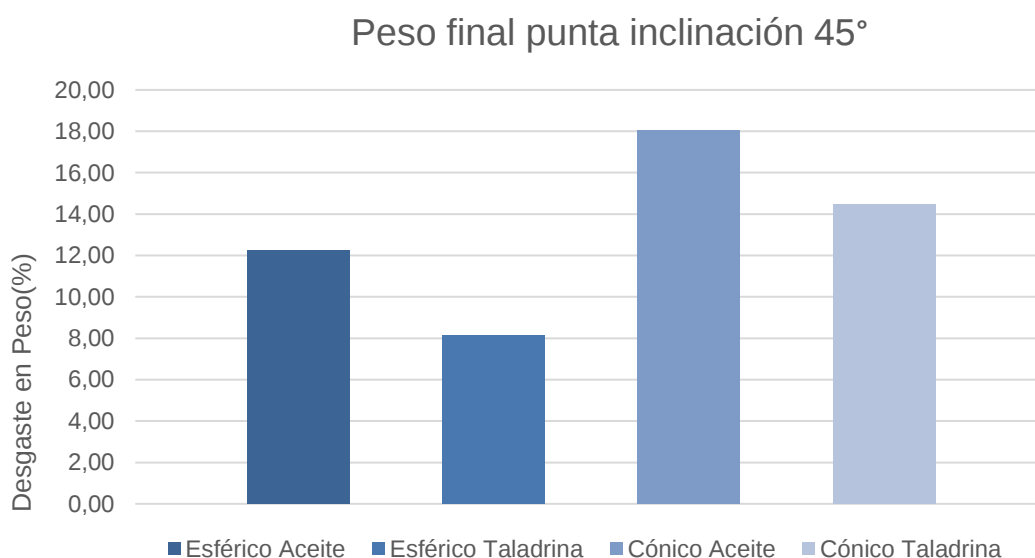


Ilustración 58. Porcentaje pérdida peso final → Puntas 45°.

En la Ilustración 58, ambas puntas sufren un desprendimiento de material producido por la fricción repetitiva entre punta y lámina, las puntas cónicas sufren una mayor pérdida de material debido a su esbeltez en la punta respecto a las puntas esféricas que son más robustas. Este desprendimiento de material debe traducirse en un descenso notable en la altura de la punta. Estos datos han sido recopilados en la Ilustración 59 para su posterior traducción.

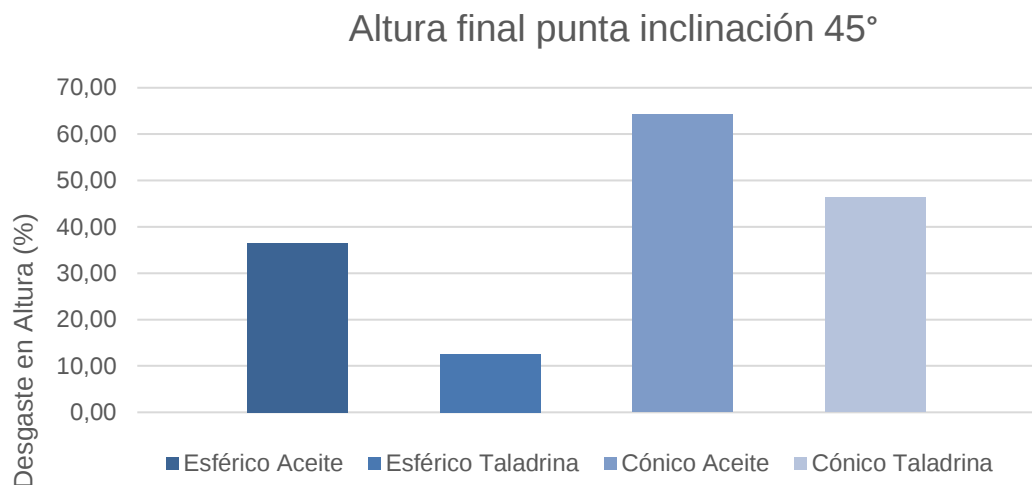


Ilustración 59. Porcentaje perdida de altura → Puntas 45°.

En el gráfico de barras anterior se muestra este descenso en la altura de los punzones debido a la pérdida de material, arrastre y apilado del mismo. En primer lugar, la geometría del punzón afecta al desgaste, ya que se ha mostrado que una punta cónica al ser más delgada en su punta sufre una mayor deformación llegando a pérdidas de altura de hasta el 64%. En cambio, para la misma configuración, usando un punzón esférico, se observa una pérdida de altura de hasta el 36%. Esta pérdida de altura se justifica con la pérdida de material; en el caso de la punta cónica se pierde un 18% en peso de material.

En el desgaste también juega un importante papel la lubricación. La taladrina no solo lubrica, sino que también refrigera. Con el uso de taladrina se reduce tanto la pérdida de material como la de altura, en el caso de las puntas cónicas la pérdida de altura se reduce de un 64% a un 46%, en cambio para el caso de las esféricas este cambio es mayor ya que se pasa de perder un 36,5% en altura a solamente un 12,5%.

En conclusión, en el desgaste la lubricación tiene un rol vital debido a que preserva el material impidiendo que este se caliente en exceso. Por otro lado, se ha comprobado que, según el diámetro de la punta, se obtienen mayores o menores desgastes. A medida que el perfil o la punta sea más esbelta, mayor será la pérdida en peso y altura.

5.2.4. Ángulos de inclinación y evolución del espesor

En esta sección los cálculos y la exposición de los datos se han realizado de igual forma que en la sección 5.1.4. Ángulos de inclinación y evolución del espesor.

En la Ilustración 60, los ángulos de inclinación de la pared de la lámina que se han obtenido son inferiores al ángulo del perfil teórico, pero aunque no se llegue a este valor máximo, la tendencia que sigue en la evolución de esta inclinación es la misma que la teórica, esto quiere decir, que a medida que el frustrum se va formando, a igual profundidad, se van generando ángulos de pared similares, esto nos indica que aunque el perfil no es exactamente igual, debido a la recuperación elástica que sufre el material tras el cese de esfuerzos, va a ser similar en cuanto a inclinación de pared.

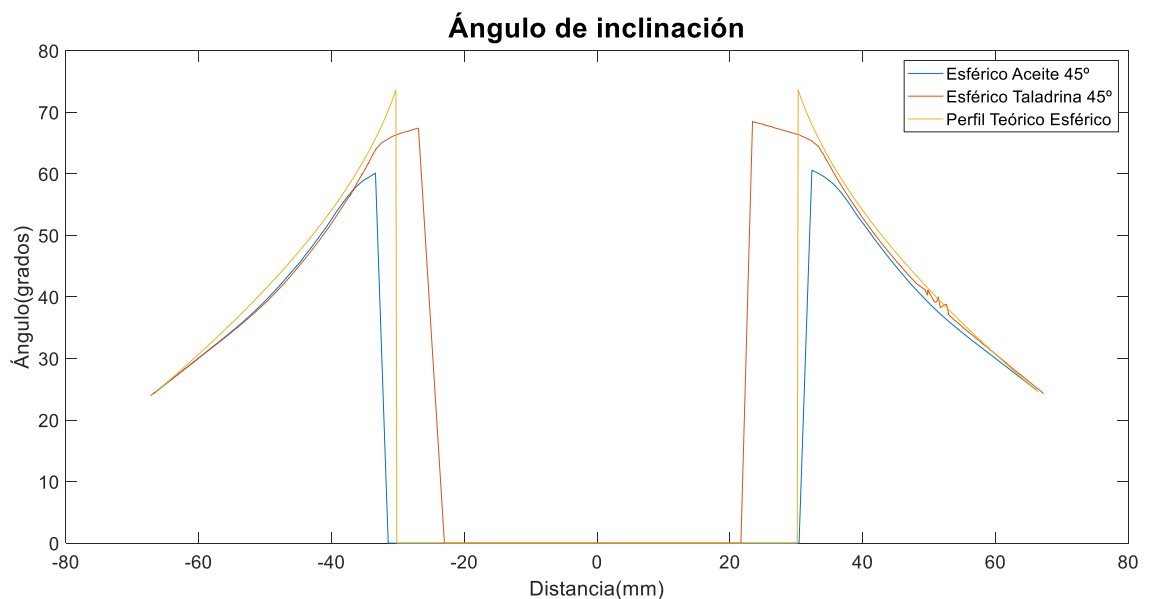


Ilustración 60. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Estérica 45°.

En este caso, con ambas lubricaciones la forma que sigue la evolución del espesor es similar a la teórica, pero en el caso del uso de taladrina se observa una gran similitud con los espesores teóricos que debe obtener la lámina a medida que avanza la deformación, ya que el material al deformarse la lámina reduce su espesor para incrementar su deformación.

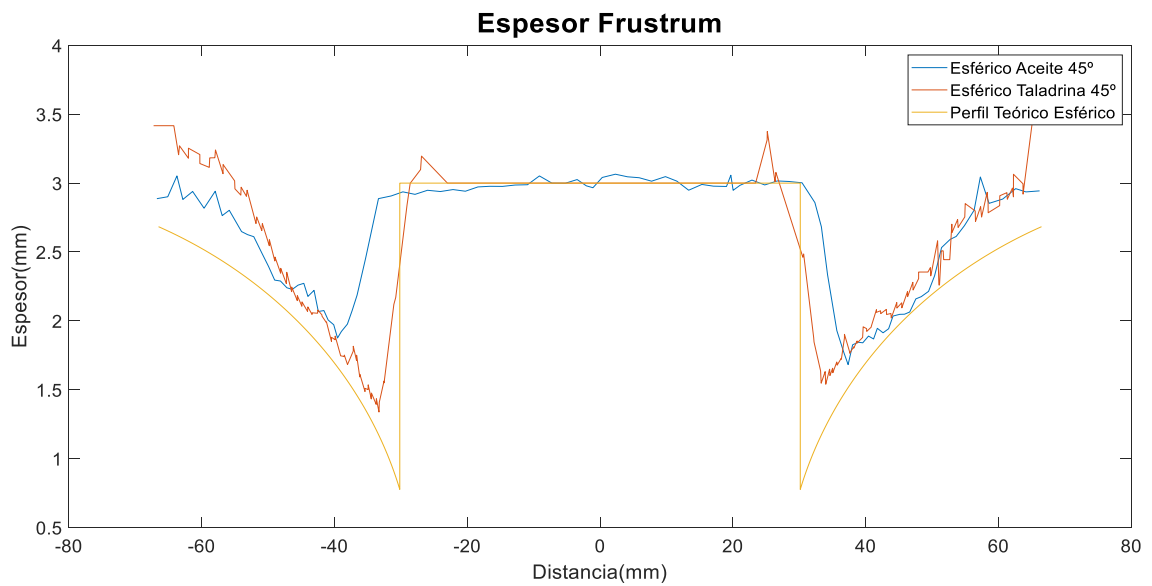


Ilustración 61. Gráfica evolución del espesor → Punta Esférica 45°.

En el caso de las puntas cónicas, se obtienen valores máximos de ángulos de inclinación similares a las puntas esféricas, pero en esta configuración el incremento de inclinación tiene una pendiente más débil a la generada en el perfil teórico. Esto puede estar provocado o asociado al desgaste de la punta.

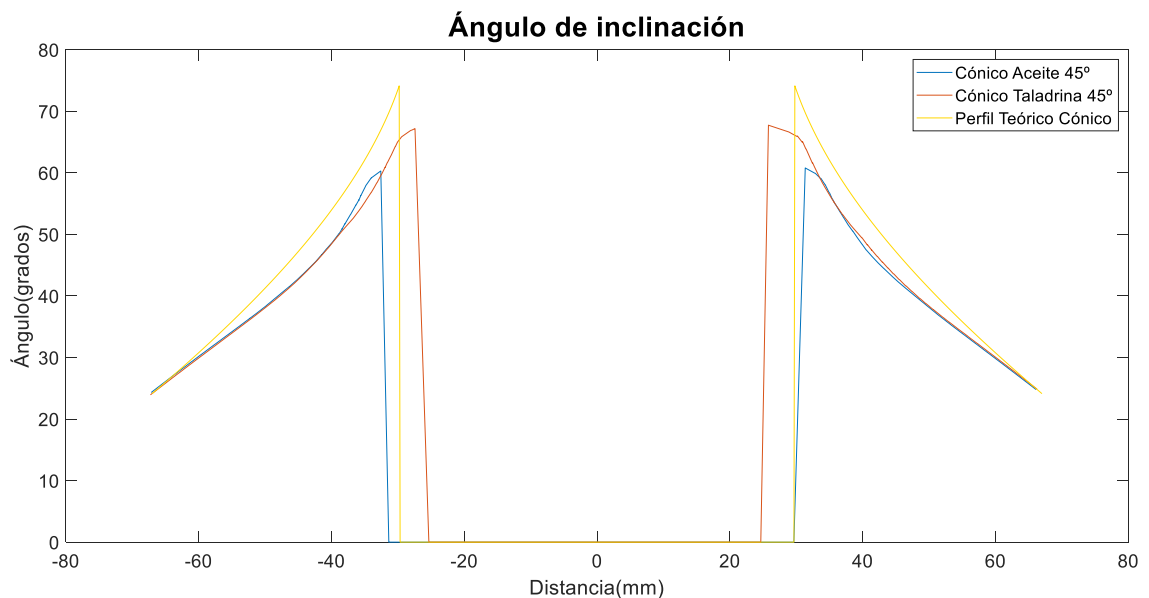


Ilustración 62. Gráfica ángulo de inclinación → Punta Cónica 45°.

En los anteriores casos, mediante lubricación por aceite se obtienen menores ángulos de inclinación, lo que indica que el perfil no se ajustará al teórico tanto como mediante el uso de taladrina.

Respecto a los espesores, usando puntas cónicas al ser la deformación más lenta, es decir, con menor pendiente debido al desgaste, le obtienen espesores de pared menores. La obtención de menores espesores de pared puede provocar rotura en la lámina, tras la superación del límite elástico pasando a deformación plástica, limitando la obtención de mayores ángulos de inclinación.

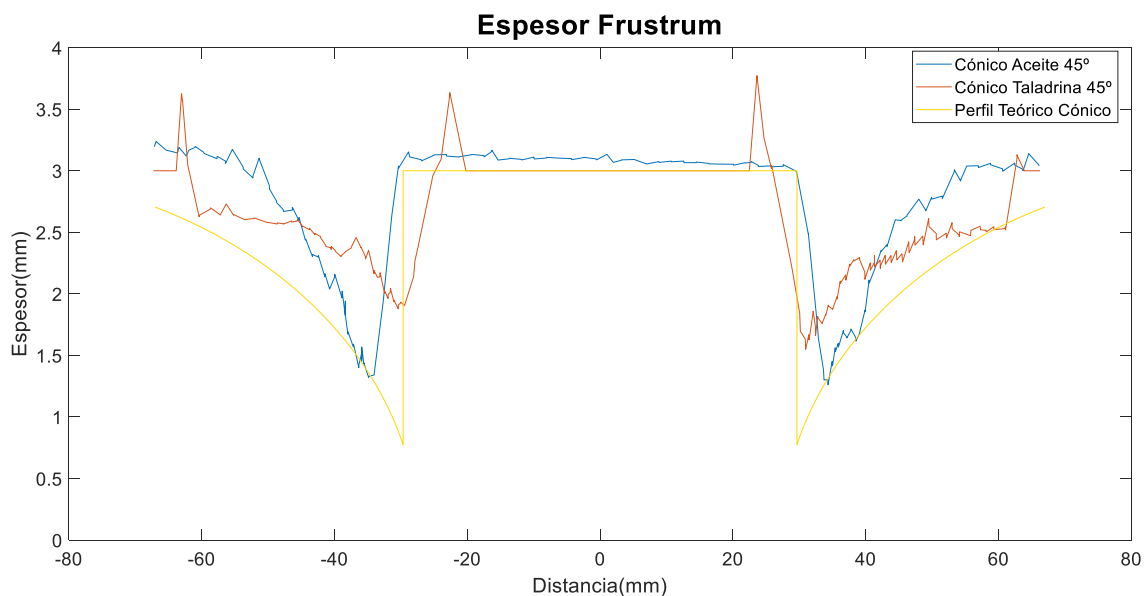


Ilustración 63. Gráfica evolución espesor → Punta Cónica 45°.

Como se ha comentado, con esta configuración de impresión no existe diferencia entre una geometría u otra debido a que con esta inclinación se favorece el desgaste de la punta cónica quedando con una geometría similar a la punta esférica, pero con una deformación más lenta. Por este motivo, los ángulos máximos empleando la misma lubricación son idénticos, como puede apreciarse en la Tabla 10. Por ejemplo, usando una lubricación por taladrina la inclinación máxima para la punta cónica es de $67,74^\circ$, en cambio, para la punta esférica es de $68,48^\circ$.

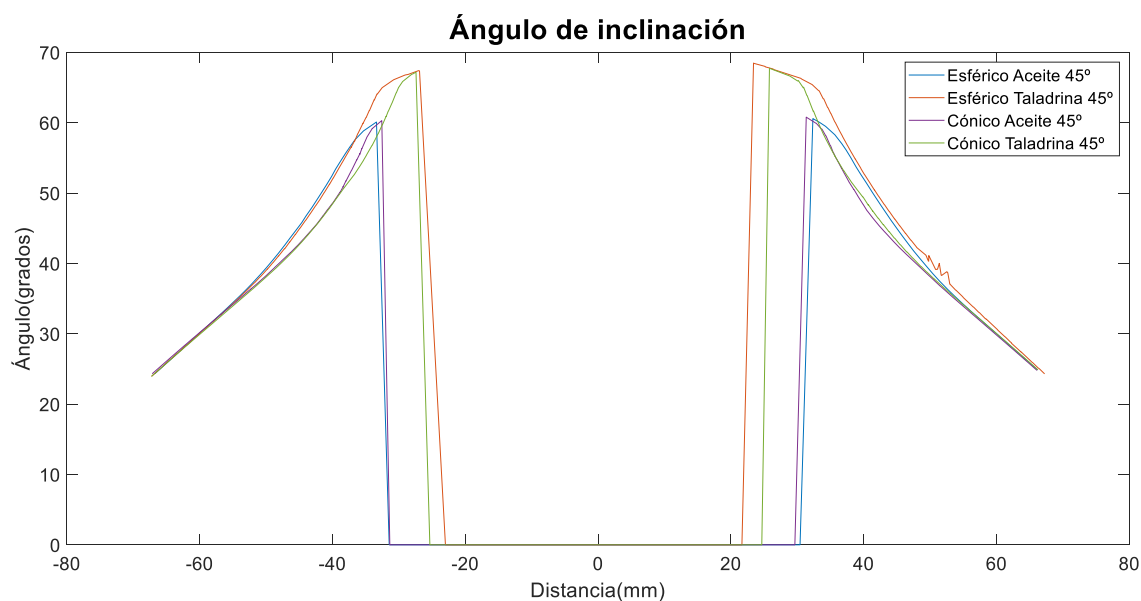


Ilustración 64. Gráfica ángulo de inclinación → Comparativa Puntas 45°.

En estos cuatro ensayos, se han obtenido mejores resultados respecto a inclinación final, ya que todos los ensayos están cerca de los límites para el PVC que es de 66° incluso en algunos casos se supera este valor, aunque se supera con valores ligeramente superiores.

Ensayo	Punta		Lubricación		Inclinación máxima alcanzada(grados)
	Cónica	Esférica	Aceite	Taladrina	
1.1					60,8
2.1					67,74
3.1					60,58
4.1					68,48

Tabla 10. Inclinación máxima → Puntas impresas a 45°.

Respecto a la evolución del espesor, se puede observar que a medida que la profundidad es mayor y se alcanzan mayores inclinaciones en la pared de la lámina, el espesor de esta es menor. Esto era de esperar debido a que el material se va estirando, reduciendo su espesor hasta alcanzar niveles que no sea capaz de superar produciendo la rotura de este.

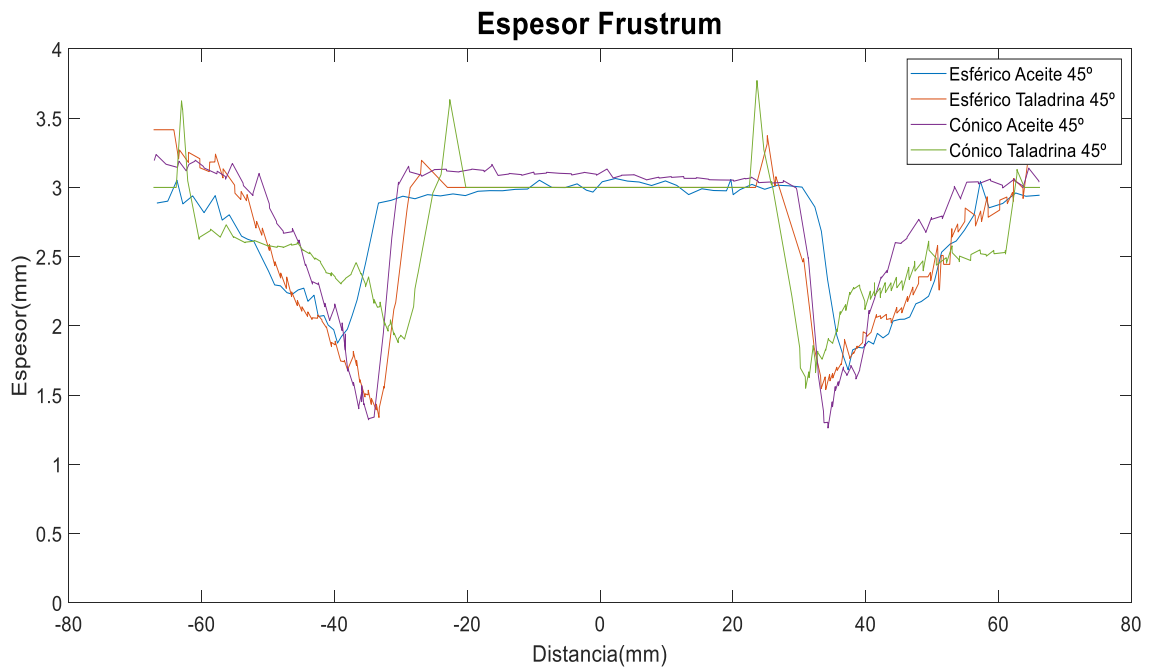


Ilustración 65. Gráfica evolución espesor → Comparativa Puntas 45°.

5.2.5. Perfil desarrollado

En esta sección se estudiarán los perfiles desarrollados tras el proceso de conformado incremental empleando puntas impresas con una inclinación de 45°, comparando los resultados con el perfil teórico de la geometría esperada, cada perfil teórico tiene en cuenta el “offset” producido por la herramienta.

En la Ilustración 66, el perfil desarrollado por la herramienta esférica reproduce fielmente el perfil teórico, pero al producirse la rotura en el punzón no se ha podido alcanzar la profundidad deseada y, por lo tanto, tampoco la inclinación de pared. Respecto a la lubricación, se aprecia que utilizando una lubricación mediante taladrina la profundidad obtenida es mayor, aunque el perfil desarrollado por ambos es idéntico. La diferencia entre estos perfiles y el teórico es, que se generan diámetros levemente inferiores esto puede estar provocado por una leve recuperación elástica del PVC.

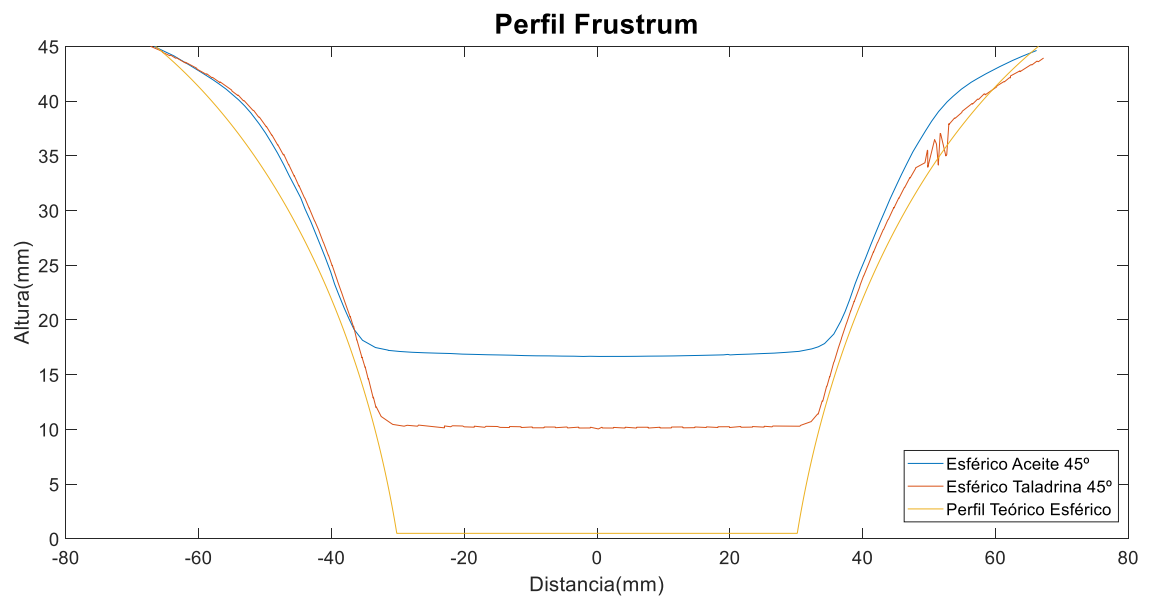


Ilustración 66. Perfil Frustrum → Puntas Esféricas 45°.

Empleando una punta cónica, las profundidades alcanzadas antes de la rotura o finalización de la trayectoria son similares en cambio el perfil desarrollado no se asemeja al teórico. Por efecto del desgaste de la herramienta, al comienzo de la trayectoria la deformación es casi nula, tras el desgaste inicial de la herramienta la deformación es más pronunciada, como puede apreciarse en la Ilustración 67, esto provoca que los diámetros y profundidades resultantes sean inferiores a los esperados.

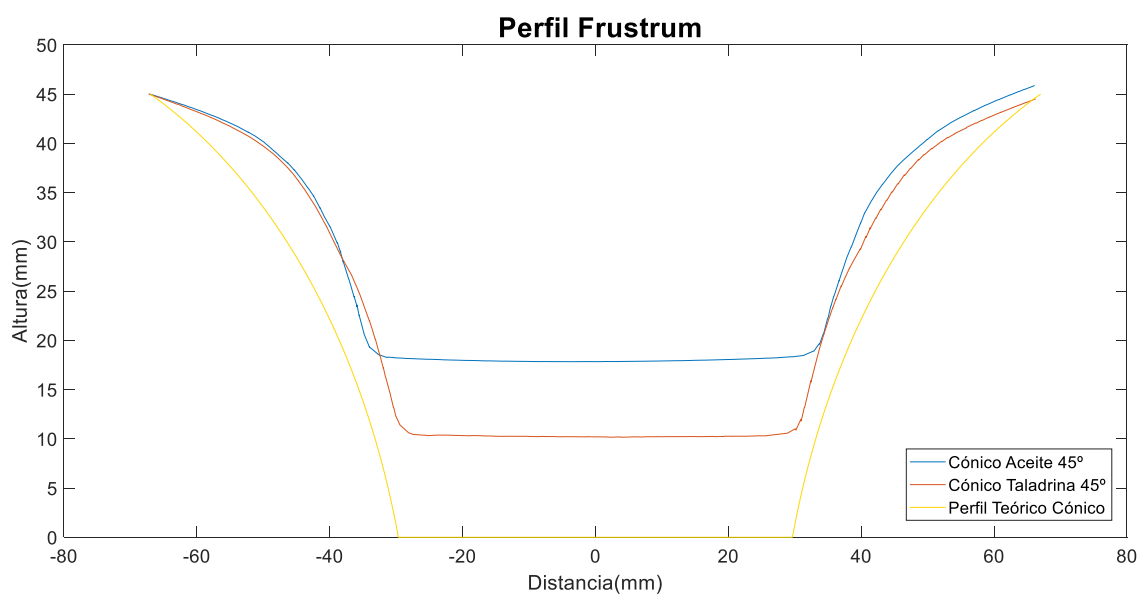


Ilustración 67. Perfil Frustrum → Puntas Cónicas 45°.

En la Ilustración 68, a simple vista se aprecia lo comentado anteriormente, las profundidades para la misma lubricación son similares o idénticas, pero, en cambio, la geometría obtenida no se identifica con la teórica debida al desgaste de la herramienta.

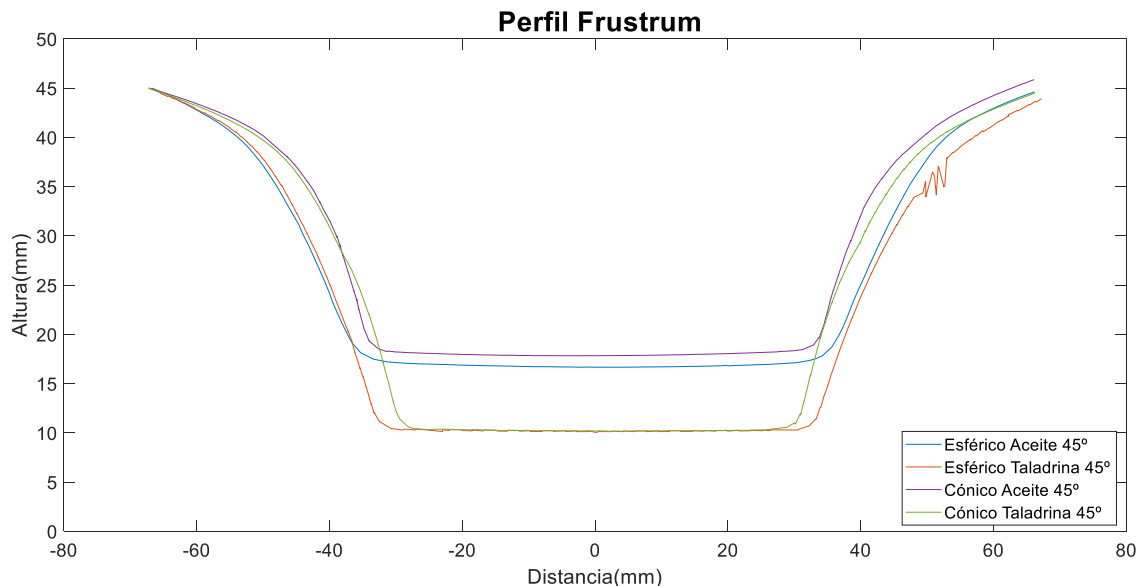


Ilustración 68. Perfil Frustrum → Comparativa Puntas impresas 45°.

En conclusión, con esta distribución de capas se alcanzan profundidades mayores independientemente de la geometría del punzón. El uso de lubricación por taladrina mejora los resultados, permitiendo alargar la vida de la punta. Por otro lado, la geometría de la punta juega un papel fundamental a la hora de la forma final del perfil, mediante puntas esféricas se obtienen perfiles similares al teórico.

6. Comparación resultados obtenidos

En esta sección se realizará una comparación de los resultados obtenidos en los ensayos anteriores. Para facilitar la comprensión del lector y no extender demasiado el informe, se expondrán los mejores resultados obtenidos en el punto 5: ensayos con lubricación por taladrina.

Estas comparaciones ayudarán a la extracción de conclusiones y criterios para poder poner este proceso en funcionamiento o si merece la pena realizar la deformación a partir de puntas fabricadas con una impresora 3D.

6.1. Fuerzas

Los mejores resultados, en niveles de proceso completado en todos los aspectos estudiados, han sido los ensayos donde se ha empleado lubricación con taladrina. Debido al uso de dos inclinaciones a la hora de fabricar las puntas de la herramienta, en las siguientes ilustraciones se comparan las fuerzas desarrolladas para llevar a cabo la deformación incremental.

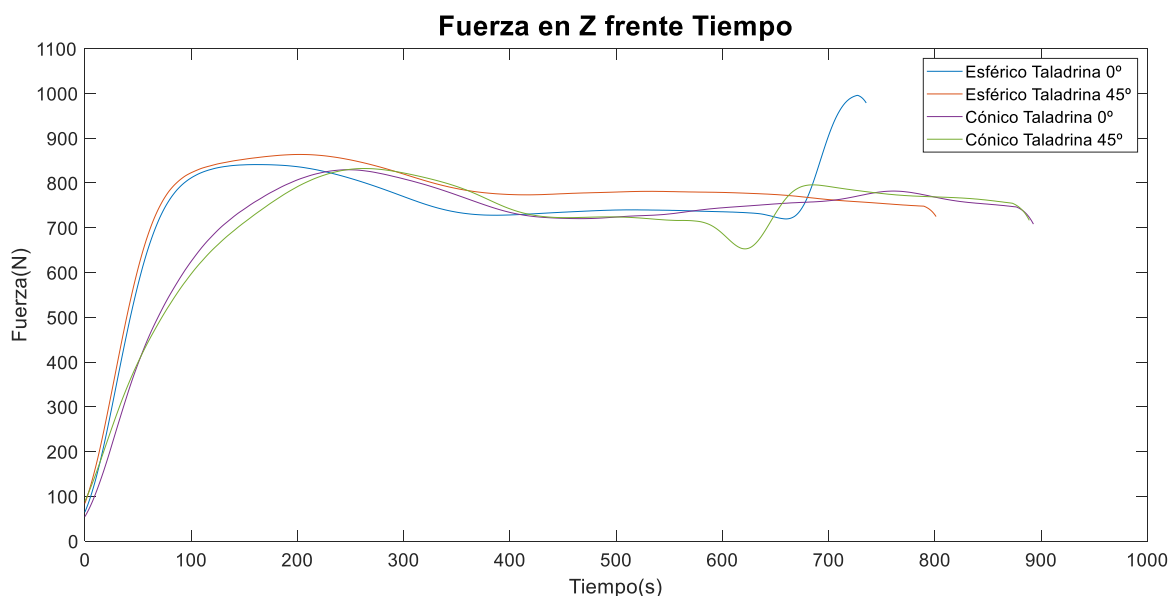


Ilustración 69. Gráfica comparativa Fuerza Z frente Tiempo → Lubricación por Taladrina.

En la Ilustración 69, se aprecia como utilizando puntas esféricas el límite elástico de la lámina se obtiene en una menor cantidad de tiempo, es decir, la pendiente con la que aumenta la fuerza en Z es mayor, esto está provocado por

el desgaste de la punta, ya que en la punta cónica, al ser más esbelta, los niveles de desgaste al inicio de la deformación son mayores, ralentizando la ascensión de la pendiente hasta alcanzar el límite elástico.

Alcanzada la cumbre de esta pendiente, ambas geometrías trabajan en los mismos rangos de fuerzas, en cambio, el empleo de 45° en la inclinación a la hora de imprimir las puntas aporta mayor resistencia a la rotura por cizalladura permitiendo alcanzar niveles mayores de proceso completado.

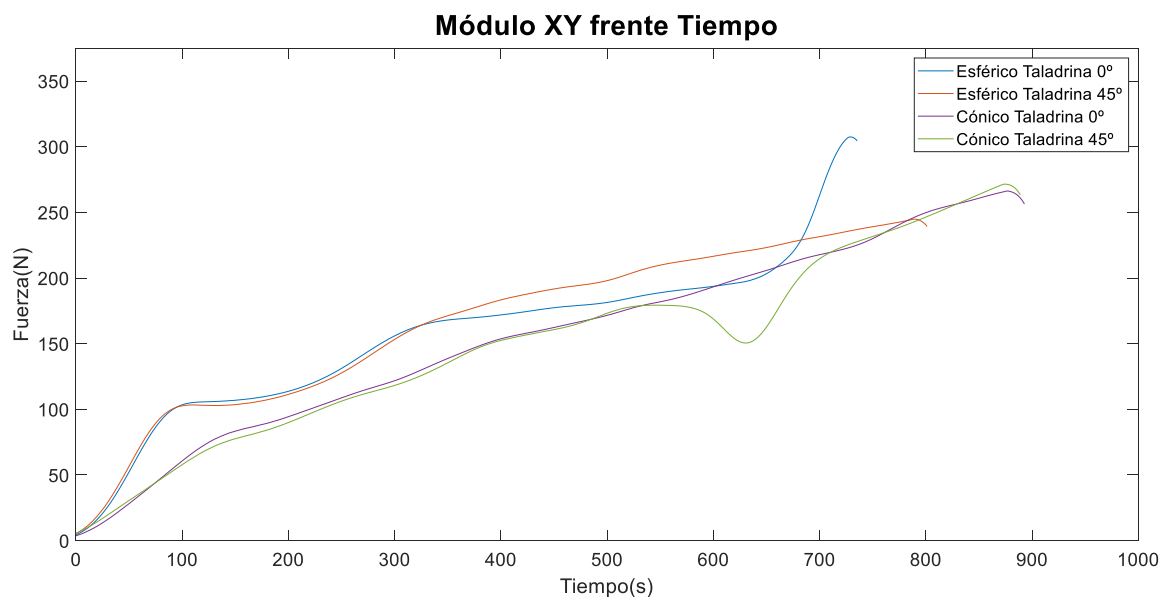


Ilustración 70. Gráfica comparativa Módulo XY frente Tiempo → Lubricación por Taladrina.

Finalmente, la evolución del módulo XY a lo largo del tiempo de ensayo (Ilustración 71) muestra que, en ambos casos, los valores van aumentando con una inclinación determinada hasta producirse la rotura del punzón, no existe gran diferencia entre el uso de una inclinación u otra a la hora de imprimir las puntas.

Por otro lado, la geometría juega un rol importante en los resultados del módulo XY, ya que empleando una geometría cónica los valores del módulo van aumentando con una menor pendiente lo que permite alcanzar niveles de proceso y esfuerzos mayores.

6.2. Desgaste herramienta

En la comparación del desgaste producido en la punta de PLA reforzado con fibra de carbono, se determinará por separado: el porcentaje de peso que se ha desprendido de la punta, y el porcentaje de altura que se ha perdido en los ensayos realizados con taladrina.

Atendiendo a la Ilustración 71, en ambos casos se aprecia como utilizando una inclinación nula a la hora de imprimir las puntas, se favorece la integridad de las puntas obteniendo menores porcentajes de pérdida de peso. Por el contrario, el uso de una inclinación de 45° respecto a la cama caliente de la impresora dispara el desprendimiento de material.

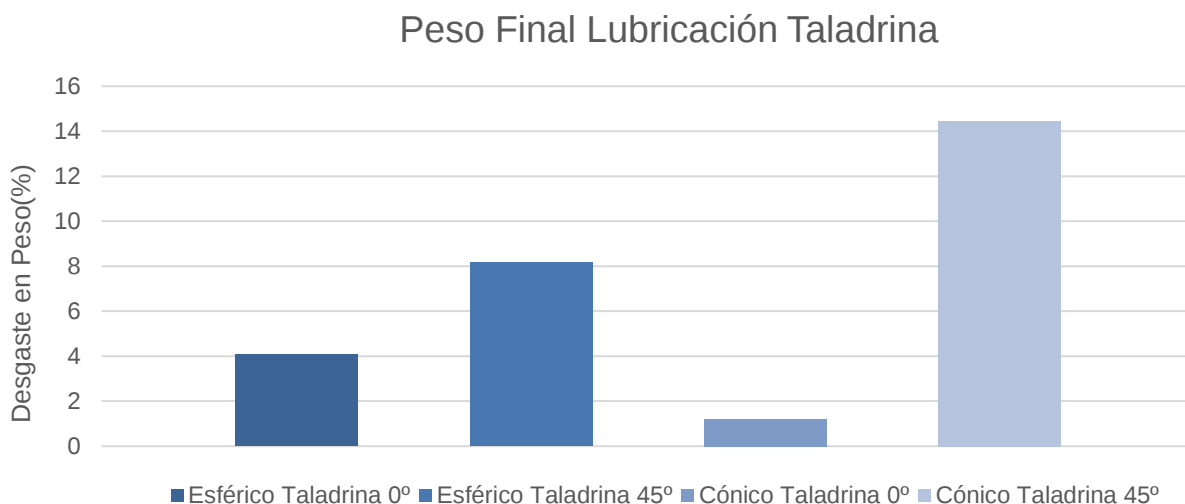


Ilustración 71. Peso Final → Lubricación Taladrina.

En cambio, la Ilustración 72 muestra que mediante una geometría esférica se reduce el desgaste, aunque el área de contacto se mayor, dicha zona es más robusta. Empleando puntas cónicas, se puede ver que se produce mayor pérdida de altura debido a la esbeltez de esta geometría, que favorece el desgaste. En ambos casos, con una inclinación de 45° se produce mayor desgaste que fabricando las puntas con las capas paralelas a la base de la impresora.

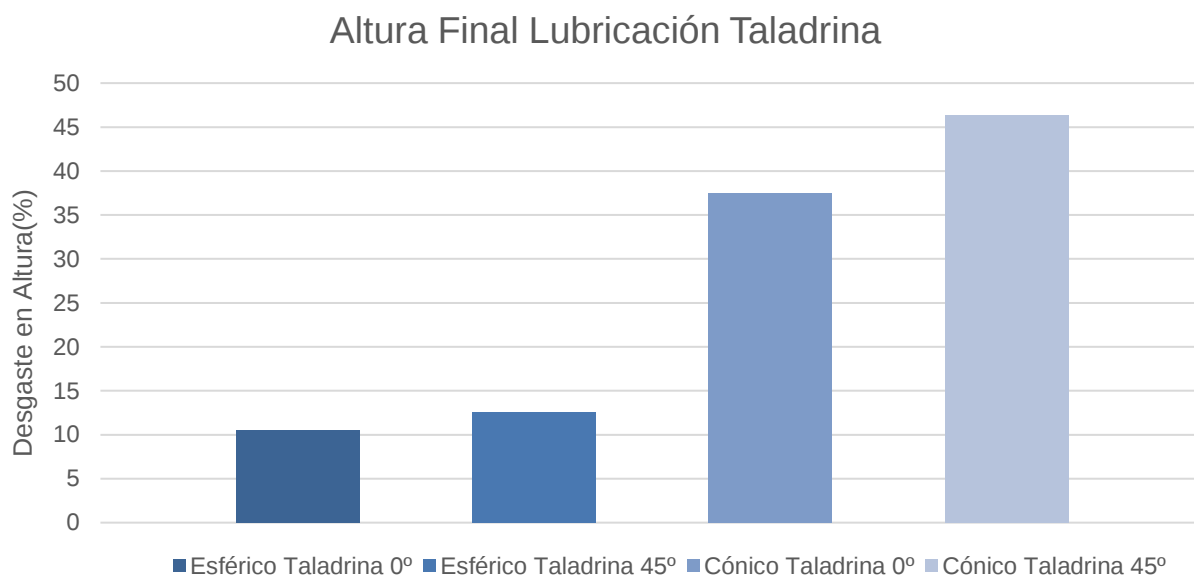


Ilustración 72. Altura Final → Lubricación Taladrina.

6.3. Ángulos de inclinación y evolución del espesor

A continuación, se representarán los ángulos de inclinación de pared para las configuraciones de ensayo que usan lubricación por taladrina.

En los ángulos resultantes, se puede ver que todas las configuraciones, excepto la punta esférica impresa a 0°, alcanzan ángulos que superan levemente el ángulo permisible del PVC, que es de 66°.

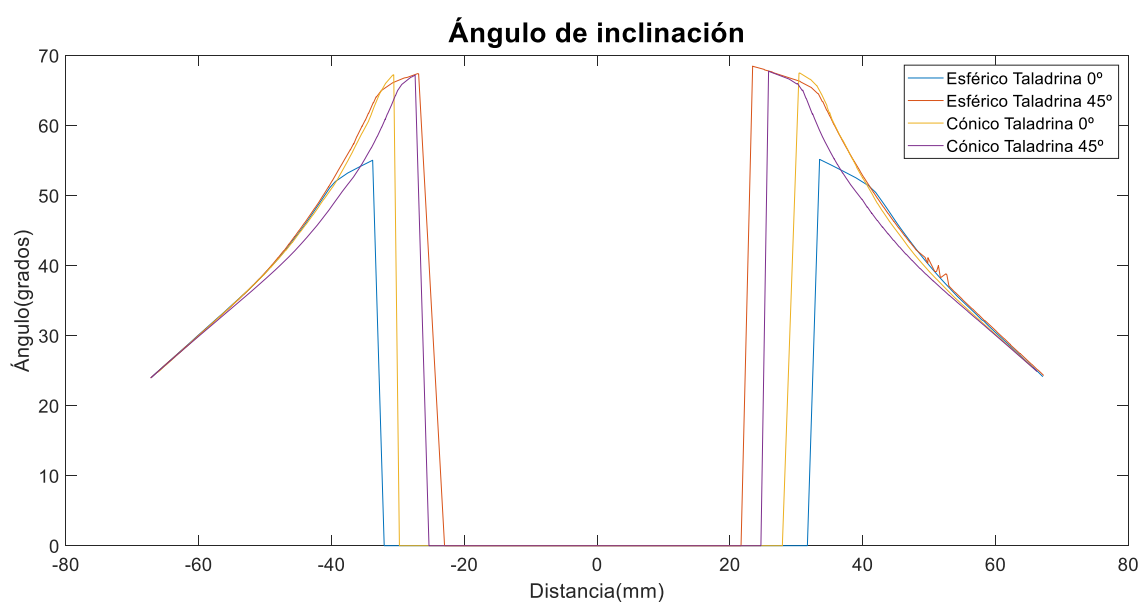


Ilustración 73. Ángulos de inclinación para ensayos con Taladrina.

Respecto a la evolución del espesor, se comprueba que la configuración más desfavorable (en la que se alcanzan menores espesores) es aquella con menores ángulos de inclinación. Esto puede estar detrás de la rotura del punzón, ya que se puede comprobar que todas las configuraciones tienen un pico sobre los 1,5 mm de espesor, zona donde se produce la rotura de la punta debido a un esfuerzo imposible de vencer por esta.

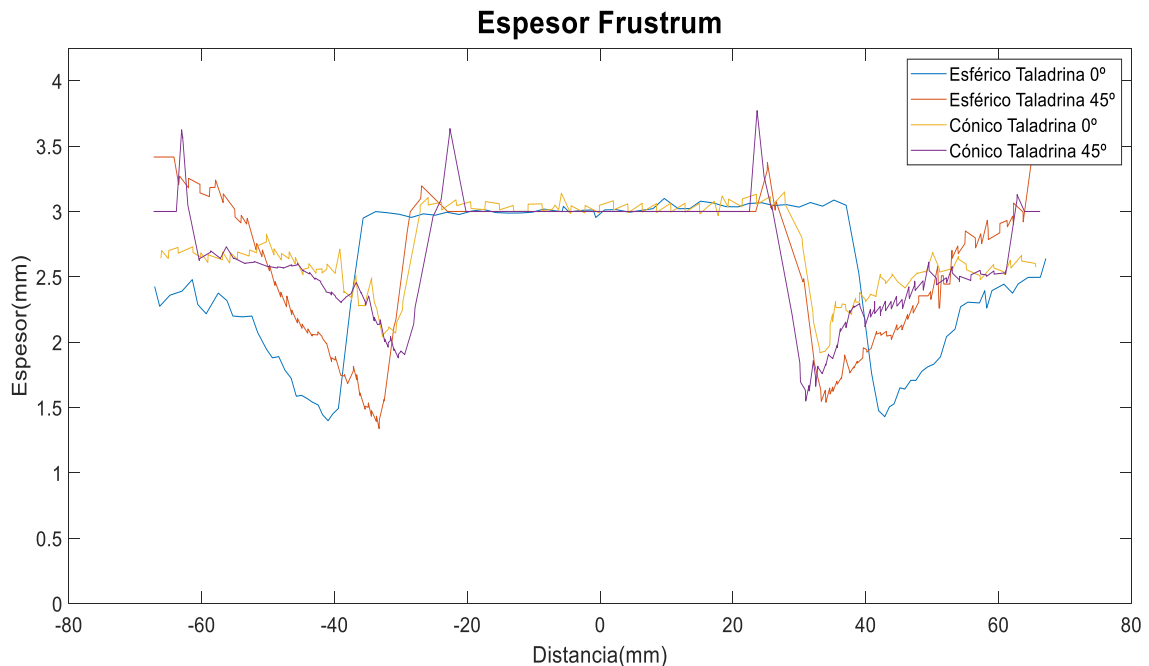


Ilustración 74. Evolución espesor para ensayos con Taladrina.

6.4. Perfil y profundidad

Como se ha comentado en puntos anteriores, la inclinación de 45° a la hora de fabricar la punta cónica, agrava el desgaste de esta. Esto explica la discrepancia de este caso con la forma teórica. En general casi todas las configuraciones generan profundidades similares, y el perfil se adapta mejor a la forma teórica que debe de conseguirse.

En la Ilustración 75, se puede comprobar que para las puntas esféricas la mejor forma de fabricación es con inclinación debido al incremento de profundidad obtenida y forma final. Por otro lado, si se desea emplear una geometría cónica, es preferible imprimir la punta con una inclinación de 0°, ya que, aunque se obtenga menos porcentaje de proceso realizado, la profundidad

final es mayor y con una mejor semejanza del perfil a la forma final debido a la reducción en el desgaste de la punta.

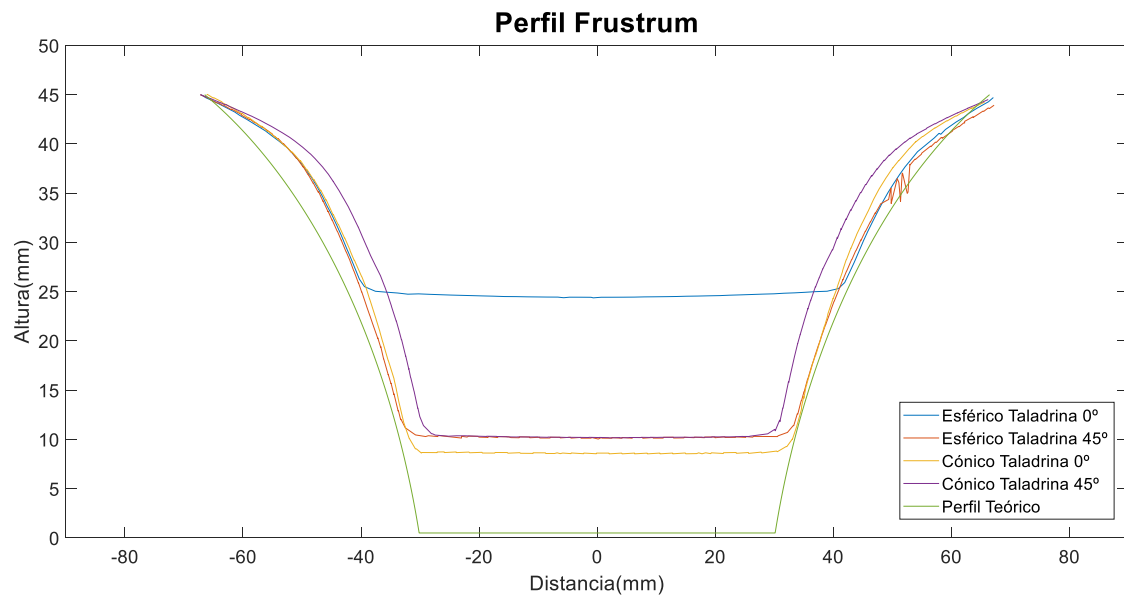


Ilustración 75. Perfil Frustrum para los ensayos con Taladrina

7. Comparación resultados con estudios anteriores

En esta sección, se compararán los resultados obtenidos mediante el uso de puntas de PLA reforzado con fibra de carbono respecto a los datos, facilitados por el área de “Ingeniería de los Procesos de Fabricación” de la Universidad de Jaén, en el conformado de una geometría Frustrum usando un método SPIF, a partir de un punzón esférico de 10 mm de diámetro.

De acuerdo, a lo comentado en el punto 6.1, las fuerzas procesadas en Z y el módulo XY no depende del ángulo de inclinación a la hora de imprimir la punta. Por este motivo, se comparará esta fuerza con las obtenidas para el ensayo con taladrina de una punta esférica impresa a 45°. Además, se incluye, el ensayo con taladrina de una punta cónica impresa a 45°, para conocer la respuesta del uso de esta geometría y material frente a la usada convencionalmente en ensayos de esta índole.

7.1. Fuerzas

Con motivo de estandarización de las gráficas y favorecer la comprensión de las medidas, los datos representados han sido filtrados.

A continuación, se representarán los datos obtenidos de la fuerza Z y módulo XY frente al tiempo que demora el ensayo con el fin de poder comparar los resultados obtenidos mediante los criterios empleados en este estudio.

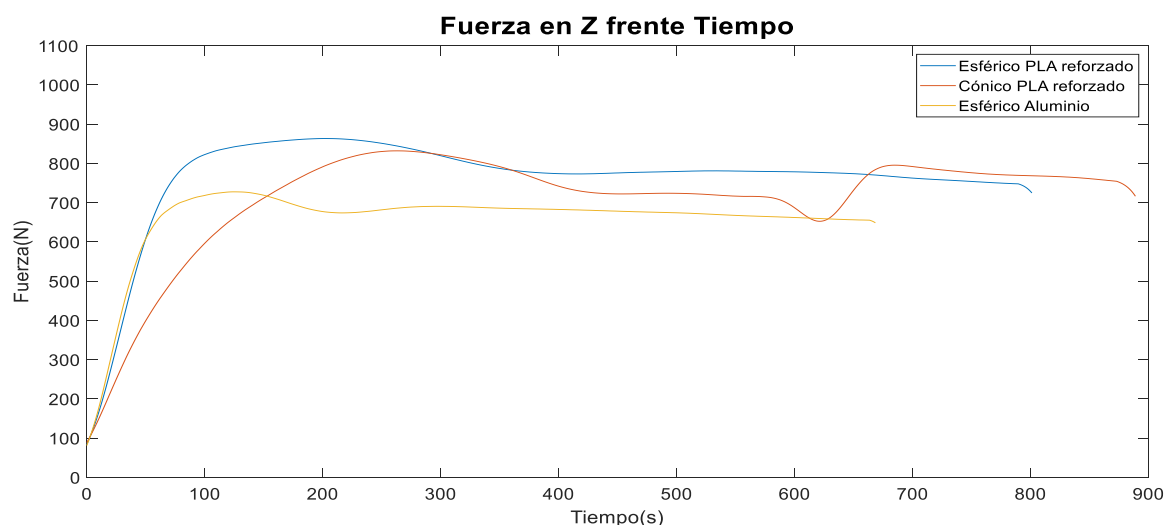


Ilustración 76. Gráfica comparativa Fuerza en Z frente tiempo según geometría y material.

En la Ilustración 76, se aprecia que, mediante el uso de puntas fabricadas con polímero, la fuerza resultante en el eje vertical es mayor que empleando aluminio. Por otro lado, se observa que la pendiente con la que asciende la fuerza al comienzo de los ensayos, hasta conseguir estabilizarse, no depende del material del punzón ya que, en los casos con puntas esféricas, estos valores son idénticos. Usando punta cónica, como ya se ha comentado anteriormente, este aumento de fuerza en Z tiene una menor pendiente debido al desgaste de la punta cónica.

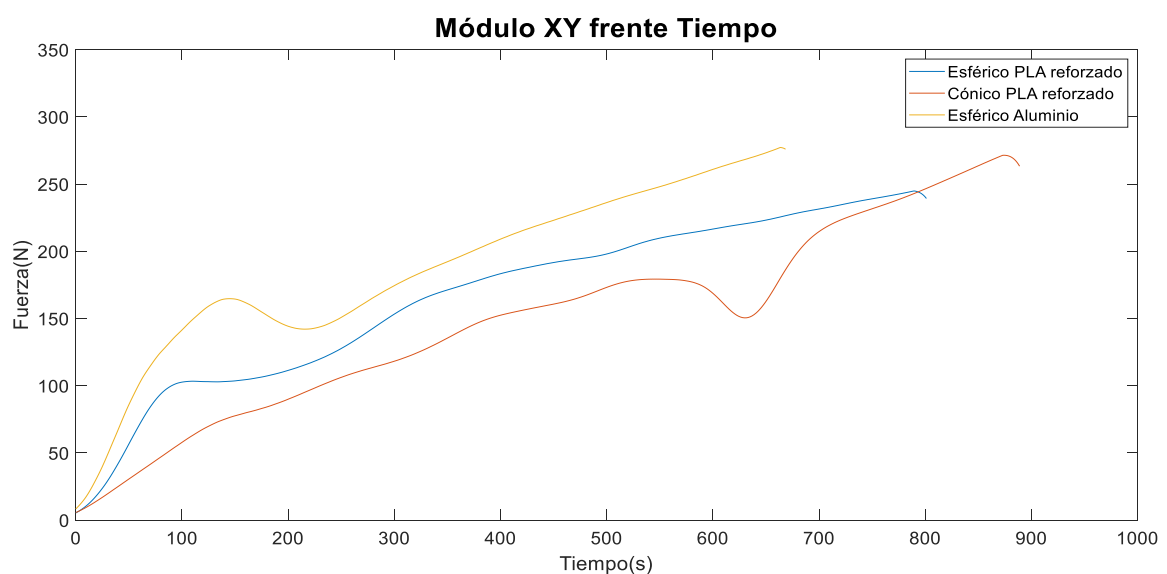


Ilustración 77. Gráfica comparativa Módulo XY frente Tiempo según tipo de geometría y material.

Finalmente, al realizar la comparación del módulo XY de las fuerzas, ocurre de manera contraria a la fuerza en Z, para el caso del punzón de aluminio se obtienen valores mayores que en el caso de la misma geometría fabricada en polímero. También existe una diferencia notable en la pendiente con la que evoluciona el módulo XY a través del proceso, ya que dicha pendiente es mayor, es decir, se alcanzan valores mayores en una menor cantidad de tiempo, en el caso de la punta metálica, tal y como se aprecia en la Ilustración 77.

En conclusión, a partir del uso de PLA reforzado con fibra de carbono se necesita realizar mayores esfuerzos en el eje vertical que usando aluminio. En cambio, en el plano XY es favorable el uso del primer material ya que se generan fuerzas menores.

8. Conclusiones y trabajos futuros

En este TFM se han analizado distintas geometrías y materiales de punzón a la hora de llevar a cabo un proceso SPIF, para ello se han realizado una serie de ensayos experimentales que ayudarán a la comprensión de esta configuración.

A lo largo de la ejecución del estudio, se han ido modificando distintos factores que intervienen en este proceso como el material, la geometría, inclinación a la hora de fabricar las piezas y el tipo de lubricación. Tras la realización de los distintos ensayos descritos en esta memoria, se ha podido apreciar que estos factores tienen un gran impacto en el correcto desarrollo del proceso.

En primer lugar, se ha comprobado que el tipo de lubricación ejerce una gran repercusión en el desgaste de la herramienta y la durabilidad de esta. En los ensayos se ha empleado aceite y taladrina, obteniendo mejores resultados con esta última, probablemente porque a la misma vez que lubrica, también refrigera la punta, manteniendo su dureza y resistencia iniciales. El aceite permite una buena lubricación, pero flaquea a la hora de disipar el calor generado por la fricción entre la punta y la lámina, haciendo que la punta se caliente, lo que favorece el desgaste.

El cambio de inclinación en la fabricación de la punta interfiere en la durabilidad de esta, es decir, al pasar de una inclinación nula a 45° se aumenta el número de capas que existen en el cambio de sección de la punta, esto mejora la resistencia a la cizalladura como se ha demostrado. Por el contrario, este cambio de inclinación afecta, negativamente al desgaste en el caso de la punta cónica que al ser más esbelta sufre un mayor deterioro, tal y como demuestran los ensayos. Este cambio de inclinación no afecta a las fuerzas ejercidas durante el proceso, pero el incremento del desgaste en la punta cónica repercute en la forma final obtenida, reduciendo las dimensiones. En la punta esférica, el desgaste no es tan significativo (al contar con una sección más robusta), obteniendo mejores resultados al cambiar la inclinación debido al aumento de la durabilidad en el cambio de sección punta-espiga.

Respecto a la geometría, no supone diferencias significativas en el perfil desarrollado y ángulos de conformado de pared, siempre y cuando, se utilicen las configuraciones más adecuadas para cada geometría, es decir, con las que se han obtenido mejores resultados. Por el contrario, la geometría afecta a la pendiente con la que evolucionan las fuerzas registradas siendo mayor para el caso de puntas esféricas, los valores máximos para ambas geometrías son similares. La geometría cónica experimenta un mayor desgaste debido a la esbeltez en su perfil, esto produce que las dimensiones finales en alguna de las configuraciones de ensayo sean menores que las esperadas, esto se soluciona escogiendo una inclinación de fabricación de 0° .

Finalmente, el material con el que se fabrique el punzón afecta a las fuerzas generadas. Los punzones de plástico incrementan la fuerza ejercida en el eje vertical, pero disminuyen la fuerza aplicada en el plano horizontal respecto a un punzón metálico. Además, empleando material plástico para la fabricación de los punzones se ha comprobado que se ha podido aumentar, entorno 2 grados, el ángulo permisible del PVC que es de 66° para puntas metálicas.

En conclusión, se obtienen resultados similares empleando geometría esférica y cónica en lo que respecta a perfil final, profundidad, evolución de espesor, ángulos de inclinación de la pared de la lámina y fuerzas máximas, siempre y cuando se emplee la configuración adecuada descrita para cada una de las geometrías, es decir, usando taladrina como lubricación y fabricando las puntas esféricas con una inclinación de 45° y las cónicas con 0° . En términos de desgaste, se ha comprobado que las puntas esféricas resaltan en este aspecto, obteniendo menor porcentaje de pérdidas tanto en peso como altura. Finalmente, empleando puntas fabricadas con polímero frente metálicas, se consiguen mayores ángulos de inclinación de la pared de la lámina y menores esfuerzos en el plano horizontal, en cambio, se necesita ejercer mayor fuerza en el eje vertical.

Realizado este estudio, se puede emplear este TFM como base a estudios futuros. Estos estudios podrían continuar sustituyendo el material de fabricación de las puntas por otro de mayor dureza, intentar estudiar o estimar el desgaste de la herramienta a medida que se realiza el proceso de conformado, registrar la posición

de la herramienta durante el proceso de conformado para realizar los cálculos correspondientes a la obtención de fuerzas tangenciales y radiales en la punta del punzón, introducir nuevas variantes respecto a la lubricación y refrigeración de la punta para mejorar los resultados o estudiar la segmentación del proceso en dos etapas, una primera deformación con puntas de material plástico y, una segunda más precisa con una herramienta metálica , con el fin de obtener mayores ángulos permisibles para el PVC.

9. Anexos

Anexo 1: Código Matlab para la obtención de la nube de puntos y generación archivo “.txt” del código ISO

```
clear all
close all
clc

%Introducción de parametros necesarios
ang_fin=input('Introducir ángulo final deseado: ');
Dini=input('Diámetro inicial (mm): ');
R=input('Radio curvatura figura (recomendable 70 mm): ');
hc=input('Profundidad figura (mm): ');
paso=input('Paso en z (ensayos anteriores 0.5 mm): ');

Y1= R*cosd(ang_fin)+hc; %altura desde centro curvatura hasta el
punto inicial de la deformación
ang_inic=acosd(Y1/R);%Inclinación inicial de deformación
X1= R*sind(ang_inic)+Dini/2;
a=1;
for i=0:0.5:hc
    ang_i=acosd((Y1-i)/R);
    Radio(a)=X1-R*sind(ang_i);
    Altura(a)=R*cosd(ang_i)-(Y1-45);
    a=a+1;
end
%Representación perfil figura

for i=1:length(Radio)
    x=Radio(i);
    for m=1:2
        A(m)=x;
        x=-x;
        B(m)=Altura(i);
```

```
end
figure(1)
plot(A,B)
hold on
end

%Planta trayectoria
q=2*pi:-0.01:0;
for n=1:length(Radio)
    for l=1:length(q)
        r1(l)=Radio(n);
    end
    figure(2)
    polar(q,r1)
    hold on
end

% Datos a exportar en archivo de texto
linea=70;
profundidad=0;
for n=1:length(Radio)
    texto(1,n)=linea;
    texto(2,n)=Radio(n);
    texto(3,n)=profundidad;
    texto(4,n)=linea+10;
    texto(5,n)=-Radio(n);
    texto(6,n)=-Radio(n);
    texto(7,n)=linea+20;
    texto(8,n)=Radio(n);
    texto(9,n)=Radio(n);

    linea=linea+30;
    profundidad=profundidad-0.5;
end

%Generar Archvo de texto con codigo ISO
```

```
fid=fopen('Codigo ISO.txt','w');  
fprintf(fid,'N%3.0f G01 X%5.2f Y0 Z%5.2f\nN%3.0f G02 X%5.2f Y0  
I%5.2f J0\nN%3.0f G02 X%5.2f Y0 I%5.2f J0\n',texto);
```

Anexo 2: Código Matlab para el tratamiento de datos y obtención de gráficas

```
clear all
close all
clc

filename=input('Introducir nombre y formato archivo entre
comillas nombre.formato: ');

A = importdata(filename, '\t', 1);
D=A.data;

inicio=1;
total=0;
Q(1)=-100;
n=2;
v=0;
for w=inicio:length(D)
    if D(w,2)==0 && D(w,3)==0 && D(w,4)==0
        inicio=w+1;
        break
    end
end
for w=inicio:length(D)
    Fx(v+1)=D(w,2);
    Fy(v+1)=D(w,3);
    Fz(v+1)=D(w,4);
    v=v+1;
end

v=0;
for w=1:length(Fx)
    T(v+1)=v*(1/20);
    Mxy(v+1)=sqrt((Fx(w)^2)+(Fy(w)^2));
    Fxx=(Fx(w));
    Fyy=(Fy(w));
```

```
        v=v+1;
end

%Operaciones de filtrado para suavizar oscilaciones Fuerza Z
%1. Filtro Standard
windowSize =round(T(length(T))/5);
b = (1/windowSize)*ones(1,windowSize);
a = 1;

yf=filter(b,a,Fz);

%2. Filtro Gaussiano
sigma = round(T(length(T))/3); % pick sigma value for the
gaussian
gaussFilter = gausswin(sigma)';
gaussFilter = gaussFilter / sum(gaussFilter); % normalize
filteredYf = conv(Fz, gaussFilter, 'same');

Xf=T;

%Los últimos datos tienden a valores inferiores modificando la
gráfica

for z=length(T):-1:length(T)-100
    Xf(z)=[];
    filteredYf(z)=[];
end

%Representación Fuerza Z frente Tiempo sin filtrar
figure(1)
plot (T,Fz)
title('Fuerza en Z frente Tiempo')
xlabel('Tiempo(s)')
ylabel('Fuerza(N)')
hold on
```

```
%Representación Fuerza Z frente Tiempo --> Filtro Standard
figure(2)
plot (T,yf)
title('Fuerza en Z frente Tiempo')
xlabel('Tiempo(s)')
ylabel('Fuerza(N)')
hold on

%Representación Fuerza Z frente Tiempo --> Filtro Gaussiano
figure(3)
plot (Xf,filteredYf)
title('Fuerza en Z frente Tiempo')
xlabel('Tiempo(s)')
ylabel('Fuerza(N)')
hold on

%Operaciones necesarias para aplicar filtros a Mxy
%1.Filtro Standard suavizar datos Mxy
windowSize =round(T(length(T))/5);
b = (1/windowSize)*ones(1,windowSize);
a = 1;
y=filter(b,a,Mxy);

%2.Filtro Gaussiano suavizar datos Mxy
sigma = round(T(length(T))/5); % pick sigma value for the
gaussian
gaussFilter = gausswin(sigma)';
gaussFilter = gaussFilter / sum(gaussFilter); % normalize
filteredY = conv(Mxy, gaussFilter, 'same');

X=T;

%Los últimos datos tienden a valores inferiores modificando la
gráfica
for z=length(T):-1:length(T)-80
```

```
X(z)=[];  
filteredY(z)=[];  
end  
  
%Representación Módulo XY frente Tiempo --> Filtro standard  
figure(4)  
%plot(T,Mxy)  
%hold on  
plot(T,y)  
title('Módulo XY frente Tiempo')  
xlabel('Tiempo(s)')  
ylabel('Fuerza(N)')  
hold on  
  
%Representación Módulo XY frente Tiempo --> Filtro Gaussiano  
figure(5)  
plot(X,filteredY)  
title('Módulo XY frente Tiempo')  
xlabel('Tiempo(s)')  
ylabel('Fuerza(N)')  
hold on
```

Anexo 3: Código Mathematica para el tratamiento del perfil a partir de la malla generada por el scanner 3D

```

points1 = Import["C:\\Users\\santi\\Dropbox\\2º Curso\\TFM\\Santi\\Ensayos\\
    \\Perfiles, espesores y angulos\\Procesado Perfiles acabados\\
    \\ConicoAceite\\ConicoAceiteInter.stl", "VertexData"];

points2 = Import["C:\\Users\\santi\\Dropbox\\2º Curso\\TFM\\Santi\\Ensayos\\
    \\Perfiles, espesores y angulos\\Procesado Perfiles acabados\\
    \\ConicoAceite\\ConicoAceiteExter.stl", "VertexData"];

p1 = points1[[Flatten[Position[points1[[All, 3]], #]&/@Select[points1[[All, 3]], #
    < 4&]], {1,2}]];

Show[Graphics[Table[Line[{{l, -5}, {l, -20}}, {l, -40,40,3}], ListPlot[p1]]

p2 = points2[[Flatten[(Position[points2[[All, 3]], #1]&)
    /@Select[points2[[All, 3]], #1 < 4&]], {1,2}]];

    Show[Graphics[Table[Line[{{l, -5}, {l, -30}}, {l, -40,40,3}], ListPlot[p2]]

Ref1 = {{-34.43,0}, {34.43,0}};

mr1 = ToExpression[{{" - 33.96", " - 7.26"}, {"34.9", " - 8.136"}}];

MT1 = Last[FindGeometricTransform[Ref1, mr1]]

Ref2 = {{-34.9, -3}, {35.6, -3}};

mr2 = ToExpression[{{" - 34.01", " - 9.912"}, {"36.29", " - 10.78"}}];

MT2 = Last[FindGeometricTransform[Ref2, mr2]]

ListPlot[{MT1[p1], MT2[p2]}, AspectRatio -> Automatic]

cinter = MT1[p1];

cexter = MT2[p2];

ListPlot[Table[{cinter[[i, 1]], Min[(Norm[cinter[[i]]
    - #1]&)/@cexter]], {i, Length[cinter]}], Mesh-> All]

```

```
espesor = Table[{cinter[[i, 1]], cinter[[i, 2]], Min[(Norm[cinter[[i]]  
– #1]&)/@cexter]}, {i, Length[cinter]}];
```

```
Export["ConicoAceite.xlsx", espesor]
```

Anexo 4: Código Matlab para el procesamiento de datos generados mediante el código anterior con el fin de mejorar la comparación

```
clear all
close all
clc

filename=input('Introducir nombre y formato archivo entre
comillas nombre.formato: ');

A = importdata(filename);
factor=45-A(1,2);
a=1;
for i=1:length(A)
    if A(i,1)<=67.25 && A(i,1)>=-67.25
        X(a)=A(i,1);
        Y(a)=A(i,2);
        E(a)=A(i,3);

        a=a+1;
    end
end
factor=45-Y(1);
Y2=Y+factor;

figure (1)
plot(X,Y)
title('Perfil Frustrum')
xlabel('Distancia(mm) ')
ylabel('Altura(mm) ')
hold on

figure (2)
plot(X,Y2)
title('Perfil Frustrum')
xlabel('Distancia(mm) ')
ylabel('Altura(mm) ')
```

```
hold on

figure (3)
plot(X,E)
title('Espesor Frustrum')
xlabel('Distancia(mm) ')
ylabel('Espesor(mm) ')
hold on

a=1;
%Angulo de inclinación como Tisza
%1Reducir inicio deformación conocido diametro inicial es 130mm

vmax=max(Y);

for i=1:length(X)
    if Y(i)==0
        rint=X(i);
        break
    end
end
rint=abs(rint);

for i=1:length(X)-1
    if Y(i)~=Y(i+1) && abs(X(i))>rint
        Ang(i)=atand((95.264-abs(X(i)))/(63.12-(vmax-Y(i))));
    end

    if abs(X(i))<=rint
        Ang(i)=0;
    end
end

Ang(length(X))=atand((abs(95.264-X(length(X))))/(63.12-(vmax-Y(length(X)))));
```

```
fprintf('Valor profundidad= %4.2f mm -->',max(Y))

figure(4)
plot(X,Ang)
title('Ángulo de inclinación')
xlabel('Distancia(mm) ')
ylabel('Ángulo(grados) ')
hold on

fprintf('  Ángulo de conformado máximo= %4.2f grados',max(Ang))
```

10. Bibliografía

- Aerens, R., Eyckens, P., Van Bael, A., & Duflou, J. (2009). *Force prediction for single point incremental forming deduced from experimental and FEM observations*. London: Springer-Verlag.
- Ambrogio, G., Filice, L., & Micari, F. (2006). *A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology, 413-416.
- Ambrogio, G., Gagliardi, F., Bruschi, S., & Filice, L. (2013). On the high-speed singlepoint incremental forming of titanium alloys. *CIRP Ann-Manuf Technol*, 243-6.
- Duflou, J., Tunckol, Y., Szekeres, A., & Vanherck, P. (2007). *Experimental study on force measurements for single point incremental forming*. Journal of Materials Processing Technology, 65-72.
- FAGOR AUTOMATION S. Coop.Ltda. (s.f.). *FAGOR CNC 8050 M - Manual de operación*. FAGOR AUTOMATION S. Coop. Ltda.
- González, M. J. (2015). *Estudio mediante elementos finitos de un proceso SPIF*. Jaén: Universidad de Jaén.
- Hidalgo, S. (2017). *Estudio de trayectorias en un sistema de conformado incremental monopunto*. Jaén: Universidad de Jaén.
- Jackson, k., & Allwood, J. (2009). The mechanics of incremental sheet forming. *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY-ELSEVIER*, 1158-1174.
- Jódar, F. (2018). *Análisis mediante software Abaqus de la influencia de diferentes parámetros mediante SPIF*. Universidad de Jaén.
- KISTLER. (2003). *KISTLER*. Obtenido de <https://www.kistler.com/?type=669&fid=36711&callee=frontend>

- Kumar, A., Alves, R., Ingarao, G., & Oleksik, V. (2017). *Single point incremental forming: An assessment of the progress and*. Journal of Manufacturing Processes, 37 - 62.
- Martins, P., Kwiatkowski, L., & Franzen, V. (2009). CIRP Annals - Manufacturing Technology. *single point incremental forming of polymers*.
- Romero, P., Aguilar, F., Dorado, R., & López, R. (Octubre 2013). Fabricación rápida de prototipos para automoción mediante deformación incremental de chapa. *Dyna*, Vol. 88 nº5 581/590.
- Shaoxing Bibo Automatic Equipment. (2019). *BIBO*. Obtenido de <http://www.ourbibo.com/>
- Skjødt, M., Hancock, M., & Bay, N. (2007). Creating helical tool paths for single point incremental forming. *Key Eng Mater*, 583-9.
- Tisza, M. (2012). *General overview of sheet incremental forming*,. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 113-120.
- Vanhove, H., Gu, J., Sol, H., & Duflou, J. (2011). Process window extension for incremental forming through optimal work plane rotation. *10th Anniversary of the international conference on technology of plasticity.*, 508–12.
- Vanhove, H., Mohammadi, A., Guo, Y., & Duflou, J. (2014). High-speed single point incremental forming of an automotive aluminium alloy. *Key Eng Mater*, 433-9.
- Xu, D., Lu, B., Cao, T., Zhang, H., Chen, J., & Long, H. (2016). Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming. *MaterDes*, 268-80.