



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA
DE CONFORMADO
INCREMENTAL MONOPUNTO**

Alumno: Rubén Cazalla Moral

Tutores: Prof. D. Gustavo Medina Sánchez
Prof. D. Rubén Dorado Vicente

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Febrero, 2017



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Informática

Don Gustavo Medina Sánchez y Don Rubén Dorado Vicente, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Simulación de un Proceso de Conformado Incremental Monopunto, que presenta Rubén Cazalla Moral, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Febrero de 2017

El alumno:

Los tutores:

Rubén Cazalla Moral

Gustavo Medina Sánchez

Rubén Dorado Vicente

Índice

1.	INTRODUCCIÓN	5
1.1.	Antecedentes.....	6
1.2.	Objetivos.....	6
1.3.	Conformado incremental (ISF)	7
1.3.1.	Spin Forming	7
1.3.2.	Single point incremental forming (SPIF)	8
1.3.3.	Deformación incremental con punzón de seguimiento.....	10
1.3.4.	Two point incremental forming (TPIF)	10
1.3.5.	Campos de aplicación del conformado incremental	11
2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	13
2.1.	Material	13
2.2.	Geometría	13
2.3.	Parámetros tecnológicos del proceso.....	15
2.4.	Utillaje, instrumentos de medida y material necesario.....	15
2.4.1.	Máquina fresadora	15
2.4.2.	Punzón.....	16
2.4.3.	Sistema de sujeción.....	17
2.4.4.	Mesa dinamométrica.....	18
2.4.5.	Cámara termográfica	20
2.5.	Definición del problema en FEM	21
2.6.	Software complementario.....	21
2.6.1.	MatLab	22
2.6.2.	WinUnisoft	22
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
3.1.	Generación del Código ISO	23
3.1.1.	Generación de la trayectoria y del código ISO en MatLab	23
3.1.2.	Simulación del código ISO	23
3.1.3.	Introducción de parámetros de funcionamiento.....	24
3.2.	Metodología.....	24
3.2.1.	Preparación de la placa	25
3.2.2.	Montaje de la mesa dinamométrica y del soporte	26
3.2.4.	Colocación de la placa y definición del origen de coordenadas	27
3.2.5.	Preparación de la mesa dinamométrica y de la cámara termográfica.....	28
3.3.	Diseño de los ensayos.....	29

3.4.	Resultados de los ensayos experimentales.....	32
3.4.1.	Geometría obtenida.....	32
3.4.2.	Perfil.....	34
3.4.3.	Rugosidad	37
3.4.4.	Fuerza	40
3.4.5.	Temperatura	46
4.	SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE FEM	51
4.1.	Creación del modelo	51
4.1.1.	Creación de la geometría.....	51
4.1.2.	Material	53
4.1.3.	Ensamblaje	56
4.1.4.	Creación del step	57
4.1.5.	Trayectoria de la herramienta	58
4.1.6.	Condiciones de contorno	59
4.1.7.	Definición de interacciones.....	61
4.1.8.	Definición de la malla.....	62
4.1.9.	Creación del JOB	66
4.2.	Análisis de Springback mediante FEM	66
4.3.	Resultados obtenidos de la simulación	68
4.3.1.	Geometría final obtenida	68
4.3.2.	Perfil.....	70
4.3.3.	Espesor.....	72
4.3.4.	Fuerzas	73
5.	COMPARACIÓN RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULACION	76
5.1.	Geometría obtenida.....	76
5.2.	Perfil.....	77
5.3.	Fuerza	77
6.	CONCLUSIÓN	80
7.	TRABAJOS FUTUROS	81
8.	BIBLIOGRAFÍA	82

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de deformación de chapa convencionales, tales como el estampado, la embutición o el laminado, son normalmente utilizados en producciones en serie ya que requieren una alta inversión en equipos y herramientas, además para cada diseño de pieza se suele requerir la fabricación de matrices y utillaje específicos, por lo que la flexibilidad de estos procesos es muy limitada.

Debido al problema de la flexibilidad en las tecnologías existentes de conformado de chapa, surge la necesidad de buscar tecnologías innovadoras como puede ser el conformado incremental o ISF (Incremental Sheet Forming), particularmente el conformado incremental monopunto o SPIF (Single Point Incremental Forming). En el SPIF se utiliza un control CNC (Control Numérico Computarizado) con una herramienta específica, normalmente un punzón con punta esférica, para realizar la deformación, lo que aporta una gran flexibilidad a la tecnología, ya que cambiando la trayectoria de la herramienta podremos obtener diferentes resultados en la forma obtenida tras la deformación. Por esta razón no sería necesaria la fabricación de un utillaje tan específico, que normalmente requiere un alto coste, y permite, a un coste rentable, la fabricación de series pequeñas y su utilización para aplicaciones de prototipado rápido, que es una técnica muy demandada por el mercado en la actualidad.

Debido a todas las ventajas del proceso de deformación incremental, es interesante estudiar cuales son las variables dominantes en el proceso y estudiar la influencia de cada una de ellas en el resultado obtenido tras el proceso de deformación, como son la geometría obtenida y el acabado superficial obtenido.

En el presente trabajo se estudiará experimentalmente un proceso de SPIF sobre placas de PVC, además de simular mediante un programa de elementos finitos o FEM (Finite Element Method) dicho proceso, para finalmente comparar los resultados obtenidos y poder así crear un modelo para poder anticiparnos a lo que ocurriría ante un cambio de las principales variables.

1.1. Antecedentes

El proceso de SPIF puede ser englobado dentro de las tecnologías de prototipado rápido, y sería bastante innovadora ya que normalmente la tecnología más estudiada dentro de este campo es la de adición de material, como puede ser la impresión 3D. Debido a ello el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Jaén ha realizado varios estudios sobre las técnicas de conformado de chapa incremental. Para la realización de estos estudios se diseñaron y fabricaron el utillaje y herramientas necesarias para adaptar una máquina CNC convencional para que funcione como una máquina de SPIF. También se estudia en la referencia [1] la aplicación de la técnica a la fabricación de componentes de iluminación de automóvil.

Se han encontrado algunos trabajos anteriores que estudian simulaciones numéricas de un proceso SPIF como el estudiado por Ruiz Ferrete F. J. (2014) [2] pero en el cual se estudian laminas de aluminio. Si que se pueden encontrar una muy buena referencia en el trabajo de González Lozano M.J. (2015) [3] en el cual se hallaron las constantes del PVC de la ecuación Johnson-Cook que son necesarias para caracterizar el material en el programa de simulación y se realizó una simulación del proceso.

La mayoría de los trabajos que se pueden encontrar en la bibliografía suelen profundizar más en la parte experimental que en la parte de simulación numérica. Sin embargo, se puede encontrar en el trabajo realizado por Henia A., Bahloul R., Belhadjsalah H. (2013) [8] y en el trabajo de González Lozano M.J. (2015) [3] diferentes modelos numéricos con los que consiguen resultados exitosos.

1.2. Objetivos

En el presente trabajo se pretende estudiar la influencia de diferentes variables en la geometría obtenida mediante un proceso de deformación incremental monopunto. Para ello, se definen los siguientes objetivos:

- Ajuste y puesta a punto del utillaje necesario para poder convertir un centro de mecanizado convencional en una máquina SPIF.
- Diseño y ejecución de diferentes ensayos experimentales.

- Utilización de una mesa dinamométrica y de una cámara termográfica para tomar datos durante la realización de los ensayos.
- Análisis y procesamiento de los diferentes resultados obtenidos mediante los ensayos experimentales.
- Configuración de un modelo en un software de elementos finitos de un sistema SPIF.
- Análisis y procesamiento de los diferentes resultados obtenidos de las simulaciones.
- Comparación de los resultados experimentales y numéricos.

1.3. Conformado incremental (ISF)

Dentro de la tecnología de deformación incremental, se pueden encontrar diferentes variantes que dependen del número de punzones utilizados, del tipo de matriz utilizada o del tipo de máquina CNC que se haya adaptado para realizar la deformación.

1.3.1. Spin Forming

El spin forming, también denominado conformado rotativo, es un proceso en el cual se fija una chapa con forma de disco, que será la que será deformada, a un mandril con la forma final que se quiere dar a la chapa, y al cual se le proporcionará un giro. Una herramienta o punzón va siguiendo el contorno del mandril y deformando la chapa mientras el mandril está girando.

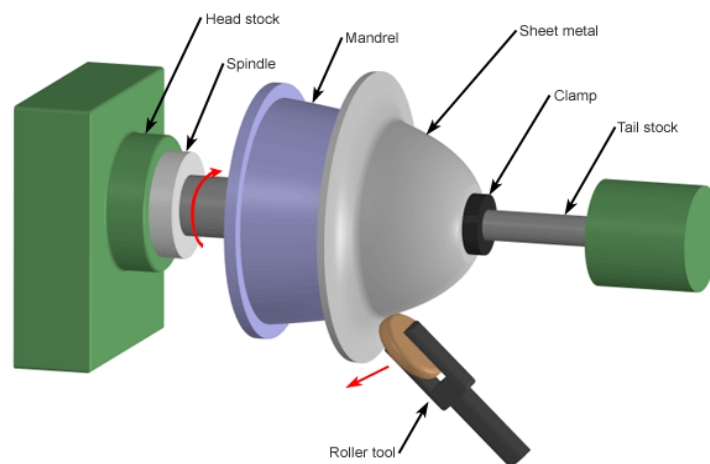


Ilustración 1.1 Esquema de spin forming

1.3.2. Single point incremental forming (SPIF)

En un proceso de SPIF, en español deformación incremental monopunto, se utiliza una herramienta o punzón de forma esférica que va deformando poco a poco una chapa, siguiendo una trayectoria determinada en el plano X-Y y realizando pequeños incrementos en el eje Z para conseguir la forma deseada. Para ello es necesario utilizar un soporte que se fija a la mesa de trabajo de la máquina de CNC y que agarre la chapa para que esta pueda ser deformada.

En este proceso la deformación es local por lo que la zona que sufre deformación es únicamente la que está en contacto con el punzón por lo que las fuerzas requeridas para llevar a cabo el proceso serán menores que en el caso de deformación por estampación, en el que obtenemos la forma final en un solo paso.

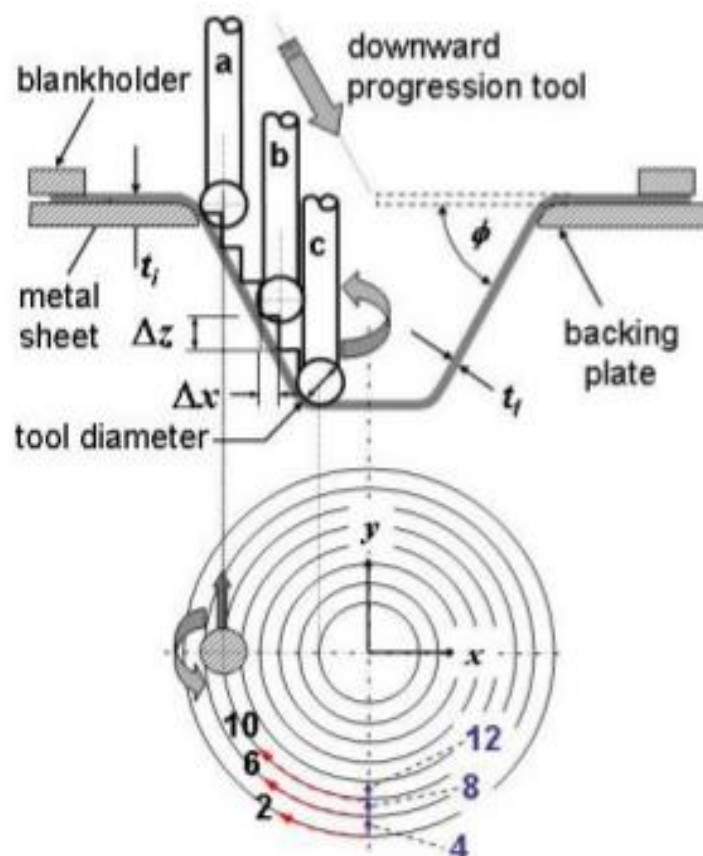


Ilustración 1.2 Esquema de single point incremental forming (SPIF)

La trayectoria seguida por el punzón es fácilmente programable utilizando lenguaje ISO, por lo que el proceso tiene una gran flexibilidad, ya que permite con un

simple cambio del programa de control numérico obtener diferentes formas en la pieza final. En la siguiente imagen se han mostrado diferentes formas que se pueden obtener mediante este proceso.

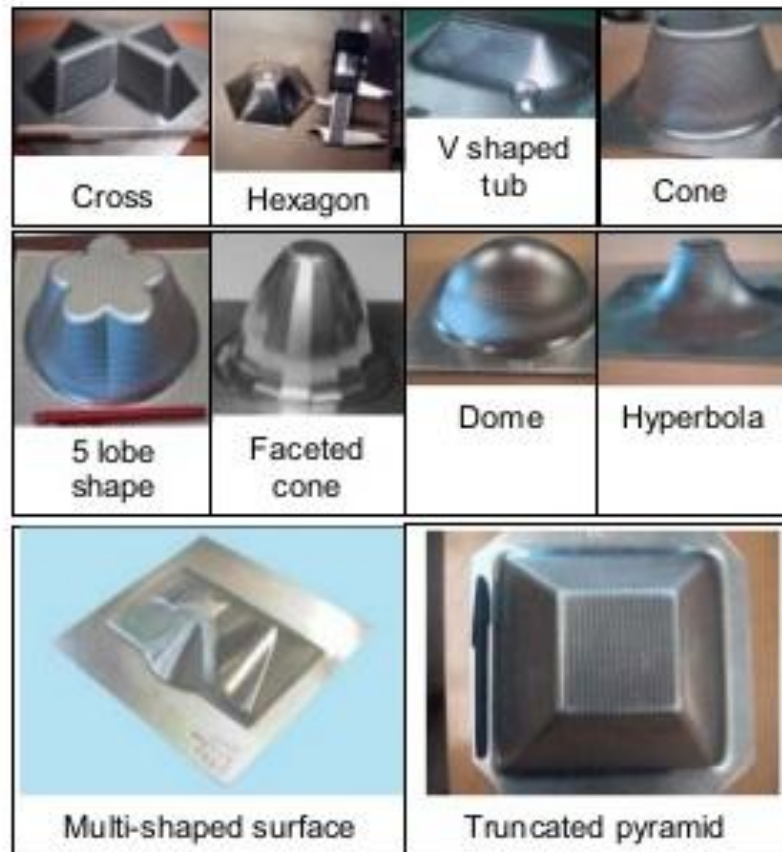


Ilustración 1.3 diferentes formas obtenidas mediante SPIF

Las principales ventajas del proceso son las siguientes:

- La forma obtenida mediante el proceso se controla mediante un programa de control numérico.
- Gran flexibilidad del proceso, el cual puede adaptarse fácilmente a cambios en el diseño de la pieza fabricada.
- La conformabilidad del material es mayor y las fuerzas ejercidas menores debido a que la deformación se produce de manera local.
- No requiere la utilización de matrices, que encarecerían el proceso.

Por otro lado las principales inconvenientes son:

- El tiempo requerido para obtener la forma final es mayor que en los procesos convencionales como puede ser la embutición o estampación.
- Es recomendable evitar el diseño de ángulos rectos en la forma final ya que requieren la utilización de estrategias multietapa.
- Precisión dimensional menor debido a la curvatura del punzón y al fenómeno de springback mediante el cual la pieza sufre una recuperación elástica cuando se desmonta del soporte.

1.3.3. Deformación incremental con punzón de seguimiento.

La deformación incremental con punzón de seguimiento es una pequeña variante del SPIF que se basa en el mismo principio, solo que en lugar de tener un único punzón realizando la deformación, tendremos dos siguiendo una trayectoria idéntica, solo que uno de ellos actúa en la parte superior de la chapa, mientras que el otro lo hace en la parte inferior, tal y como podemos observar en la siguiente imagen.

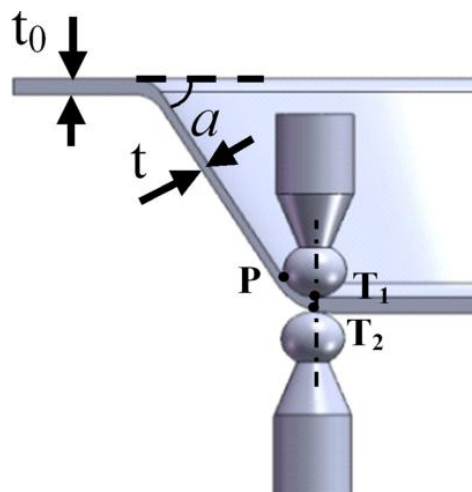


Ilustración 1.4 Esquema de deformación incremental con punzón de seguimiento

1.3.4. Two point incremental forming (TPIF)

Otra de las variantes, es la conocida como deformación incremental bipunto, en la cual se coloca una matriz con el negativo de la forma final requerida y que sirve como apoyo, ayudando a reducir la fuerza ejercida por el punzón y a conseguir

mejor precisión dimensional. La matriz utilizada puede ser completa o parcial tal y como se muestra en la ilustración 1.5.

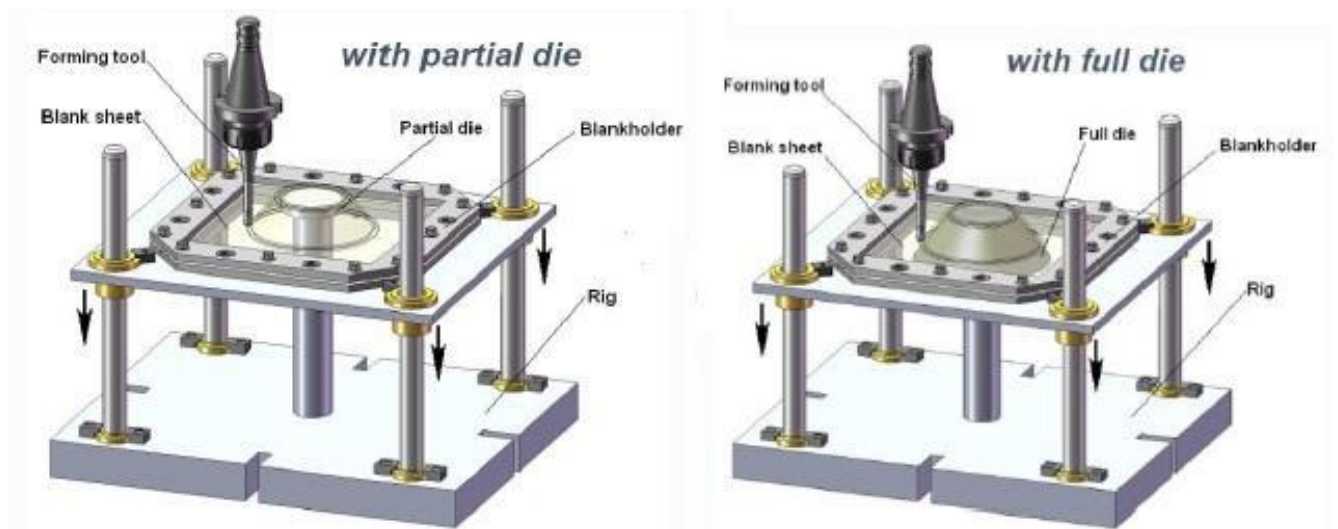


Ilustración 1.5 TPIF con matriz parcial (dcha) y con matriz completa (izq)

1.3.5. Campos de aplicación del conformado incremental

Principalmente el conformado incremental se utiliza en tiradas pequeñas, piezas especiales y productos personalizados. Uno de los principales campos de aplicación en los que actualmente se está trabajando con esta tecnología es la industria del automóvil, concretamente en el prediseño de reflectores de faros, de colectores del sistema de escape e incluso para el diseño de piezas de carrocería, como pueden ser el capó o guardabarros.

También podemos encontrar aplicaciones fuera de la industria del automóvil. Un campo de aplicación muy interesante es la fabricación de prótesis médicas. Debido a que cada prótesis es diferente según el paciente, el tipo de operación y el tipo de lesión, el método de deformación incremental es muy apropiado para realizar la fabricación de prótesis. En la siguiente imagen podemos ver el proceso a seguir para la fabricación de una prótesis craneal mediante deformación incremental.

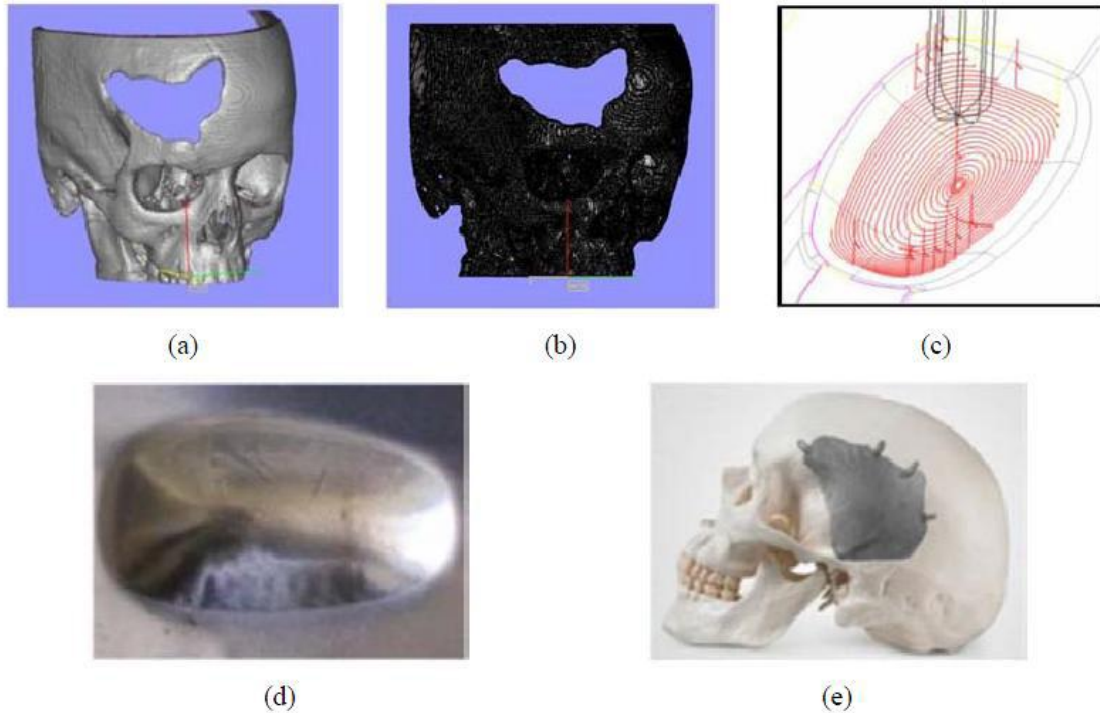


Ilustración 1.6 proceso de fabricación de una prótesis craneal mediante SPIF

Otros campos de aplicación interesantes son la arquitectura, fabricación de electrodomésticos, la industria marina, y particularmente la industria aeroespacial en la que se está realizando numerosos estudios para poder aplicar la tecnología de deformación incremental a los procesos de fabricación.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se definirá el problema a resolver, tanto experimental como numéricamente, se indicará el material de la chapa que va a ser deformada, su geometría inicial y la geometría que finalmente queremos obtener.

Se especificará todo el material necesario para realizar los ensayos experimentales, además de los instrumentos de medida utilizados durante el proceso.

Por otro lado se hará una pequeña introducción al software utilizado para resolver el problema numéricamente que en nuestro caso será el software de elementos finitos ABAQUS.

2.1. Material

El material empleado, tanto para realizar los ensayos como para realizar la simulación numérica, será PVC ya que en trabajos anteriores de la Universidad de Jaén ya se ha trabajado con este material. Además, en el trabajo de González Lozano M.J. [3], se realizó la caracterización elasto-plástica completa de este material, y se calcularon los coeficientes de la ecuación de Jonhson Cook. Disponer de esta caracterización es de gran ayuda, ya que con los coeficientes de Jonhson Cook se puede caracterizar fácilmente el material dentro del software de elementos finitos.

También se estudiará la influencia del material del cual está fabricado el punzón que va a realizar la deformación. Se han fabricado dos punzones diferentes, uno de aluminio y otro de acero. Los punzones han sido fabricados mediante un torno y ambos constan de una punta esférica de 10 mm de diámetro.

2.2. Geometría

La geometría de la placa sobre la que se va a realizar la deformación es de 3 mm de espesor y 205x205 mm.

La geometría que se desea obtener es un tronco de cono, con una pendiente de 60° y base circular de 138 mm. La geometría final es la mostrada en la siguiente imagen.

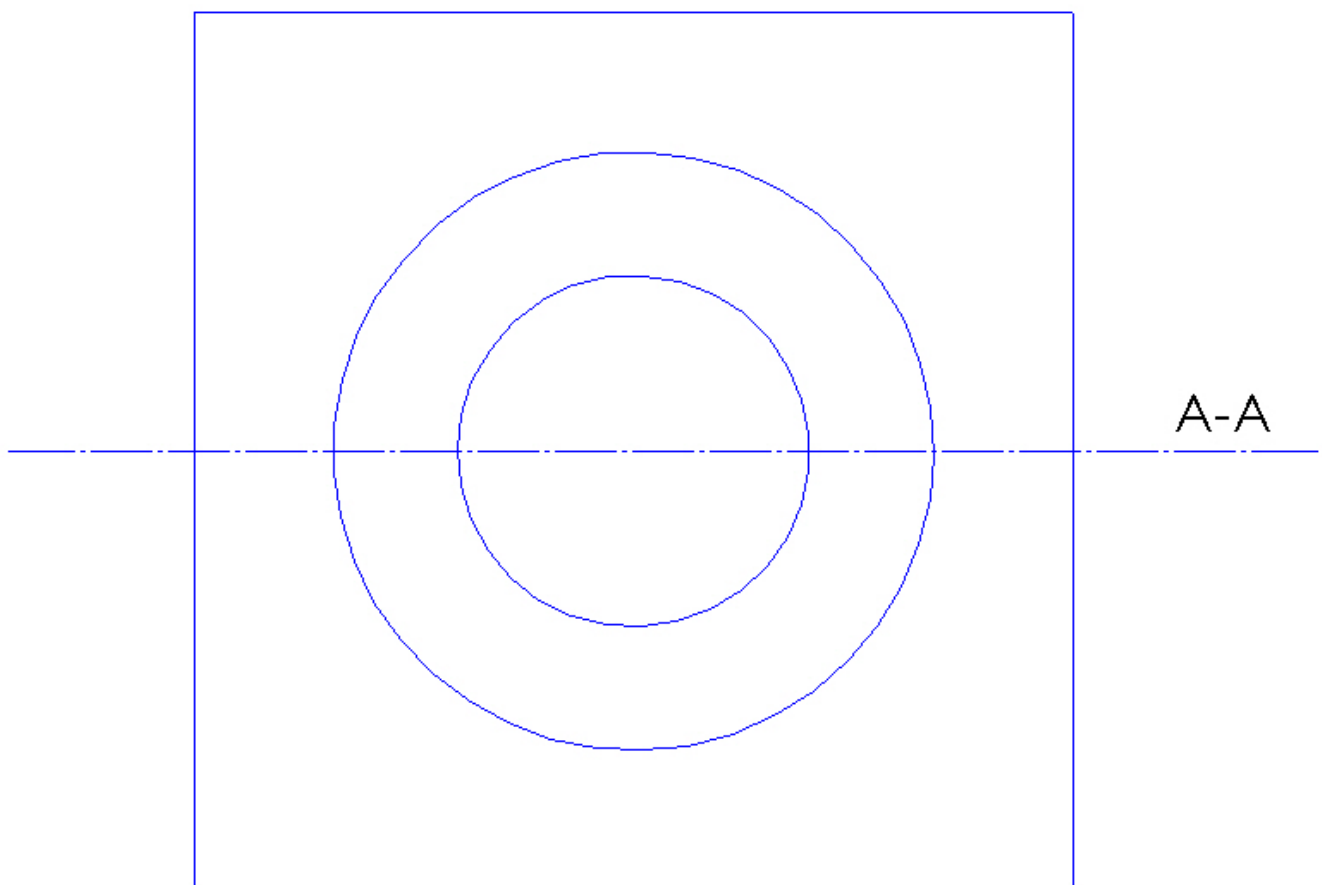
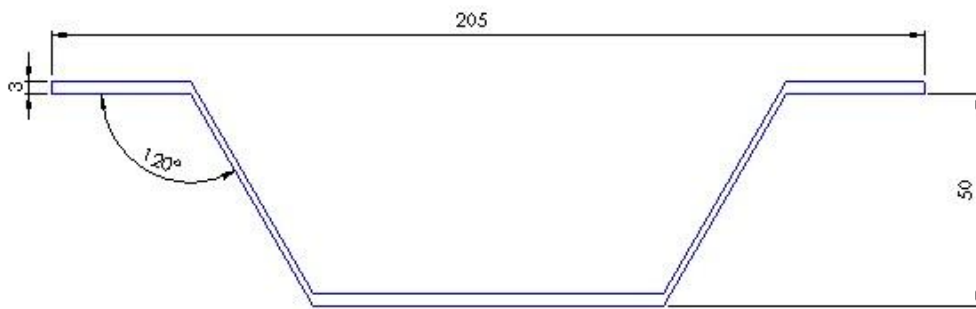


Ilustración 2.1 Esquema de la geometría teórica deseada

2.3. Parámetros tecnológicos del proceso

Para poder realizar la deformación se debe definir la velocidad de avance, con la que se realizara la deformación. Esta velocidad debe de ser constante durante todo el proceso, independientemente de la trayectoria seguida por la herramienta. En este aspecto se ha tomado como referencia el trabajo de González Lozano M.J. [3], donde se seleccionó una velocidad de avance de 1500 mm/min obteniendo ensayos exitosos, por lo que se ha optado por mantener esta velocidad.

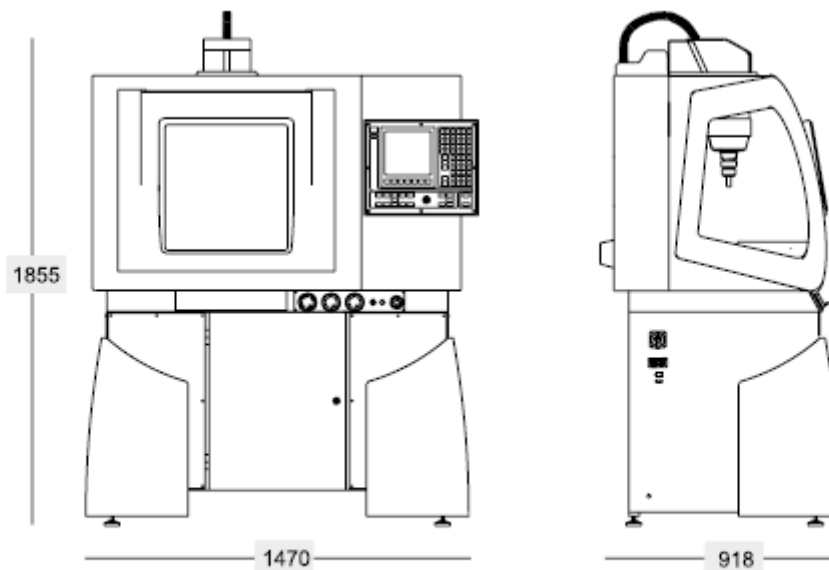
Con respecto a la velocidad de giro del punzón, tenemos la posibilidad de aplicar una velocidad de giro al cabezal portaherramientas o dejarlo girar libremente. Debido a que la velocidad de giro del punzón será una de las variables que se van a modificar para observar su influencia en el resultado final obtenido, se detallaran más adelante los valores que se han seleccionado.

2.4. Utillaje, instrumentos de medida y material necesario

En este capítulo se especificará todo el material que ha sido empleado para poder realizar el desarrollo experimental, y se mostrará en la medida de lo posible las características técnicas y generales de las diferentes máquinas, utillaje e instrumentos utilizados.

2.4.1. Máquina fresadora

Para la realización de los ensayos experimentales se ha utilizado un centro de mecanizado didáctico de control numérico modelo ODISEA de la marca ALECOP, que se encuentra disponible en el taller mecánico de la Escuela Politécnica Superior de Jaén. A continuación se muestran las características técnicas de dicho centro de mecanizado así como sus dimensiones.



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

Ilustración 2.2 Ficha técnica del centro de mecanizado ODISEA

Para introducir el código ISO se ha utilizado un ordenador que está conectado con el control numérico del centro de mecanizado.

2.4.2. Punzón

Se han fabricado dos punzones diferentes, uno fabricado en aluminio y otro en acero, para comprobar la influencia del material en el proceso de deformación.

Estos punzones se han fabricado a partir de diferentes tochos utilizando un torno ECLIPSE presente en el taller mecánico. Ambos punzones fueron fabricados con las mismas dimensiones que son 140 mm de largo y con punta esférica de 10 mm de diámetro. La forma de ambos punzones se ha representado en la siguiente imagen:

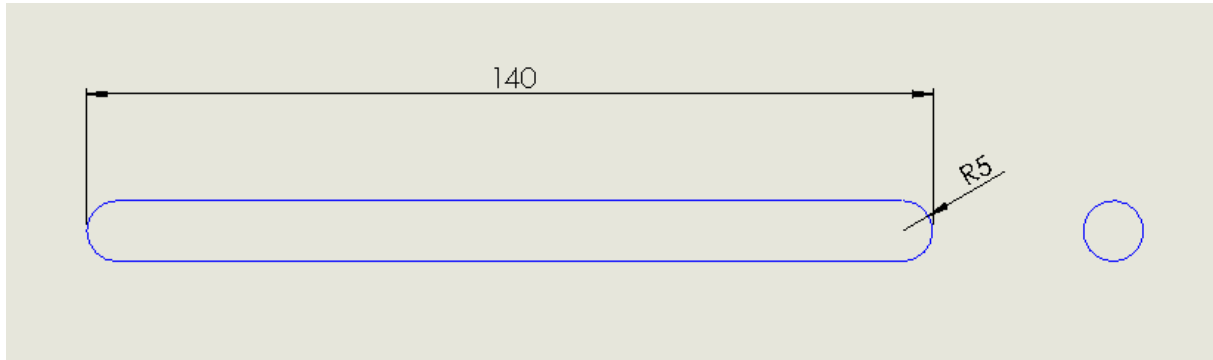


Ilustración 2.3 Esquema de la geometría del punzón

Ambos punzones pueden ser acoplados al cabezal del centro de mecanizado utilizando el portaherramientas de 10 mm.

2.4.3. Sistema de sujeción

Para poder fijar la placa a la mesa del centro de mecanizado se ha adaptado un soporte que ha sido utilizado anteriormente por el departamento de Ingeniería de Procesos de Fabricación en trabajos anteriores. Este sistema de sujeción consta de 4 perfiles colocados de forma que la chapa queda por encima de la superficie de la mesa del centro de mecanizado, de una matriz sobre la que ira colocada una placa de acero que consta de un agujero de 140 mm de diámetro y por último una matriz superior, la cual sirve para poder fijar la placa que se va a deformar mediante una serie de tornillos que pasan a través de las dos matrices y que con la ayuda de unas tuercas aportaran la fuerza necesaria para realizar la sujeción de esta placa durante el proceso de deformación.

Para mejor entendimiento del funcionamiento del soporte se ha realizado un esquema, que se puede observar en la siguiente imagen:

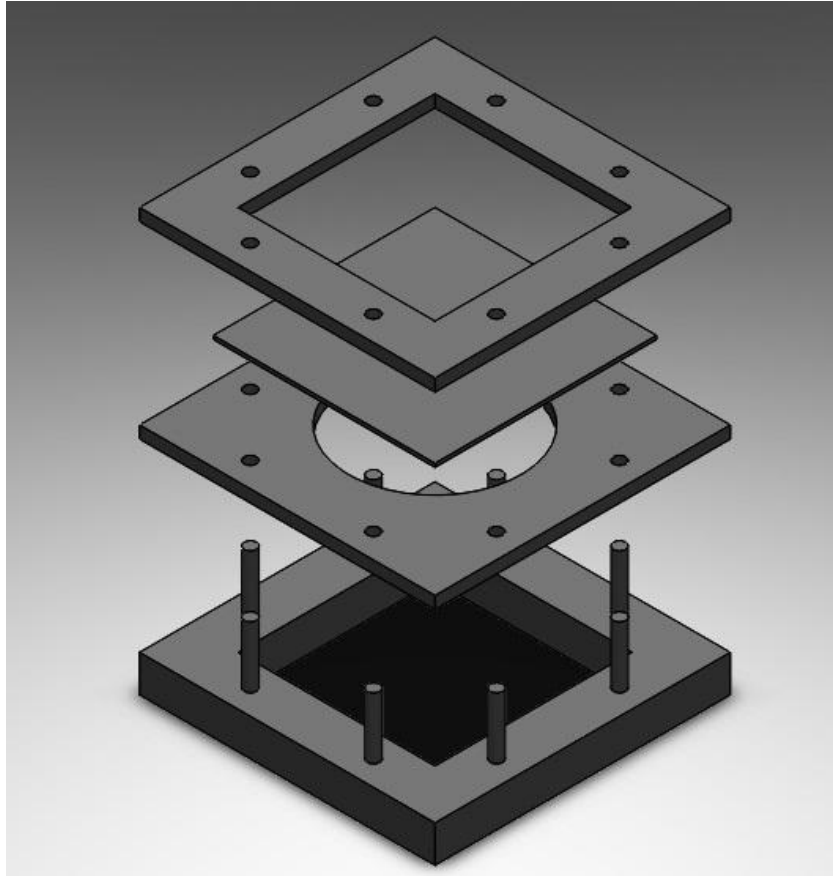


Ilustración 2.4 Esquema del soporte de sujeción

2.4.4. Mesa dinamométrica

Se ha utilizado una mesa dinamométrica marca KISTLER modelo 9257BA, que es capaz de medir el valor de la fuerza en cada uno de los ejes cartesianos.

Además de la mesa son necesarios una unidad de control y un cable de conexión para conectar esta unidad de control a la mesa. Ambos son accesorios proporcionados por KISTLER siendo la unidad de control el modelo 5233A1, mientras que el cable es el modelo 1500B5. También es necesaria una tarjeta de adquisición de datos, y se ha utilizado un ordenador que la tiene incluida y que está presente en el taller mecánico. Este ordenador también consta del software necesario para la interpretación de datos de fuerza.

A continuación se muestra un esquema de cómo quedaría montado el conjunto completo para la toma de medidas de fuerza:

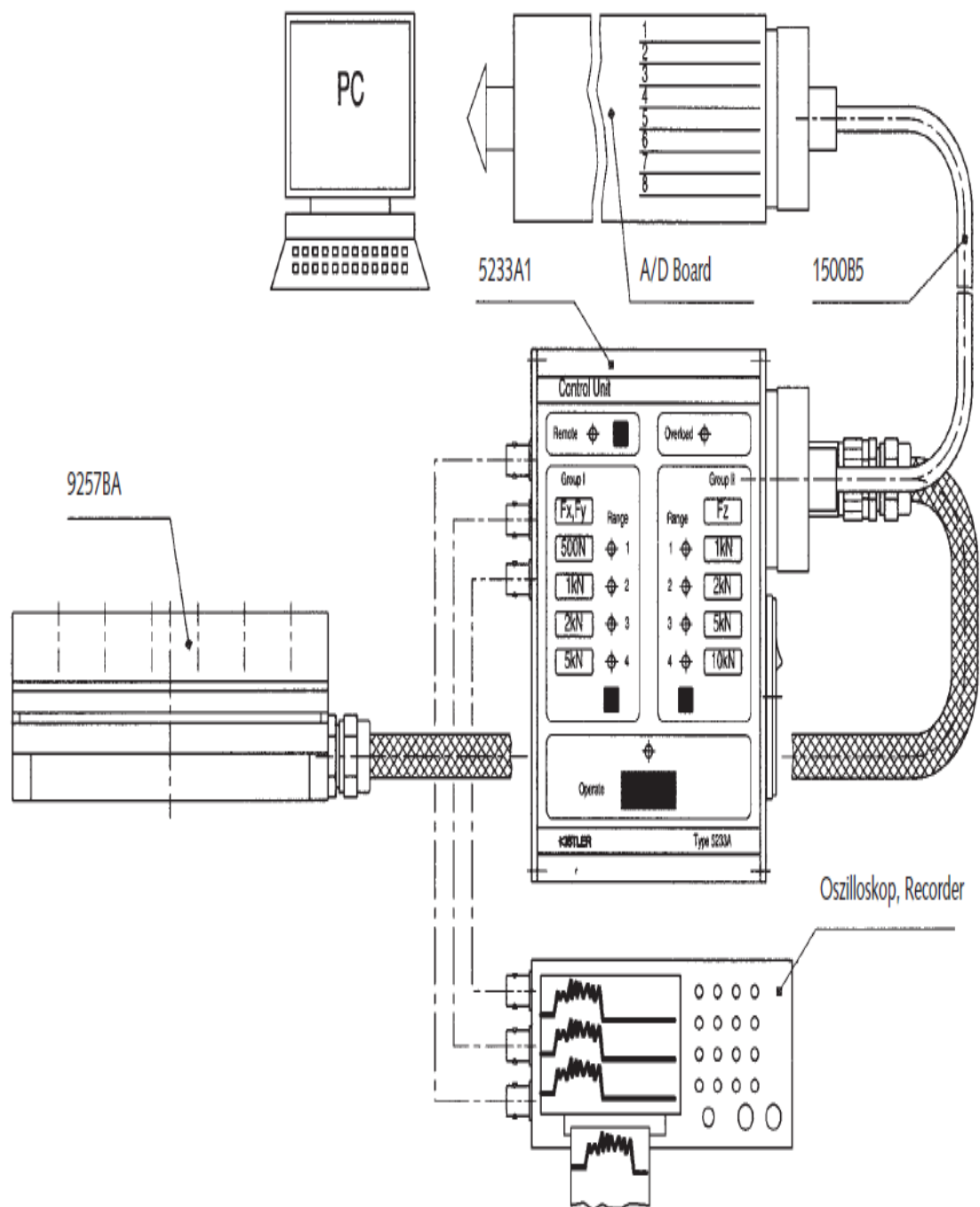


Ilustración 2.5 Esquema de sistema de adquisición de datos de mesa dinamométrica KISTLER

También se mostrará a continuación las especificaciones técnicas de la mesa:

Technical Data

Dynamometer Type 9257BA

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

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

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

Control Unit Type 5233A1

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

Ilustración 2.6 Datos técnicos de la mesa dinamométrica KISTLER

2.4.5. Cámara termográfica

Para poder visualizar la distribución de temperaturas en la placa durante el proceso de deformación se ha utilizado una cámara termográfica FLIR serie T, como la que podemos ver en la siguiente imagen.



Ilustración 2.7 Cámara termográfica FLIR

La cámara ha sido colocada en un trípode de manera fija, para poder grabar de esta manera el proceso completo de deformación.

2.5. Definición del problema en FEM

El problema definido también se va a resolver mediante la utilización de un software de elementos finitos, el cual nos permitirá calcular una solución numérica únicamente utilizando un ordenador personal.

Para resolver este problema se ha seleccionado el software ABAQUS del grupo SIMULIA, debido a que es ampliamente utilizado en el sector ingenieril para resolver diferentes problemas y simulaciones de procesos de fabricación.

Concretamente se ha utilizado el modulo Abaqus/Cae que consta de una interfaz en la que se pueden introducir todos los parámetros necesarios para crear el modelo FEM que va a ser simulado de una manera cómoda.

2.6. Software complementario

En este apartado se enumeraran y se hará una breve descripción de los diferentes programas informáticos utilizados para realizar el desarrollo experimental y procesar los datos obtenidos.

2.6.1. MatLab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Entre las principales funciones de este software se encuentra la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos y la comunicación con programas en otros lenguajes.

2.6.2. WinUnisoft

WinUnisoft es un software principalmente utilizado para controlar un centro de mecanizado con control numérico.

Con este software se pueden realizar simulaciones de la trayectoria programada con un código ISO, así como transmitir los códigos del PC al centro de mecanizado, para poder activarlos desde el panel de control.

Se puede trabajar con diferentes tipos de máquinas como pueden ser el torno o la fresadora, e incluso se puede modificar la geometría del tocho en el que se va a realizar el mecanizado.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Generación del Código ISO

El código ISO es un lenguaje de programación, utilizado para definir la trayectoria de la herramienta así como los diferentes parámetros de funcionamiento de una máquina herramienta con control numérico. Este código puede ser utilizado en diferentes tipos de máquinas siempre que el movimiento de estas este controlado por un control numérico, algunos ejemplos son impresoras 3D, fresadoras o tornos.

En los siguientes apartados se explicara detalladamente cómo se ha obtenido y configurado el código ISO necesario para que el punzón siga la trayectoria necesaria para obtener la geometría deseada en la placa de PVC.

3.1.1. Generación de la trayectoria y del código ISO en MatLab

Para la generación del código ISO que interpretara la máquina de CNC se ha escrito un código en MatLab. Este código nos permitirá calcular la trayectoria y escribir el código ISO necesario para realizar la deformación a partir del diámetro de la primera circunferencia, de la pendiente del tronco de cono, de la altura final del tronco y del paso incremental en z. Con estos datos de entrada se calcularan las diferentes circunferencias que debe seguir el punzón para cada incremento de Z. El código se incluirá en el anexo como **codigoCNC.m**.

El valor de las variables de entrada para obtener el código ISO del tronco de cono de nuestro problema son las siguientes:

- Diámetro de la primera circunferencia 138 mm.
- Pendiente del tronco de cono 60°.
- Altura del tronco de cono 50 mm.
- Paso incremental en z de 0.5.

3.1.2. Simulación del código ISO

El código ISO generado por Matlab será simulado en WinUnisoft para asegurarnos de que la trayectoria programada es la correcta y no hay errores.

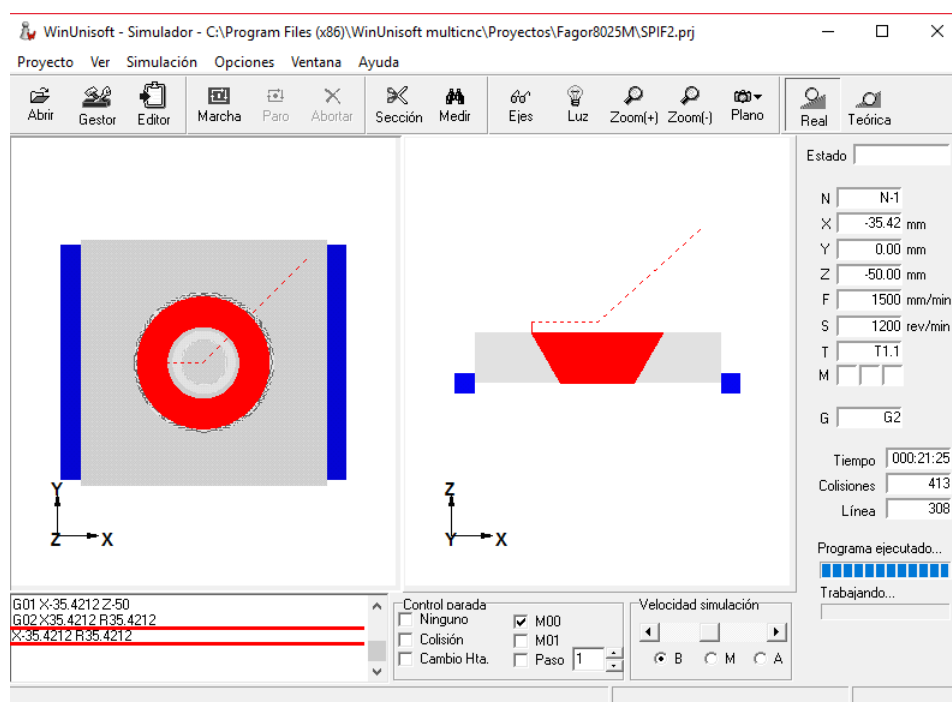


Ilustración 3.1 Simulación del código ISO en WinUnisoft

De esta manera podemos cargar el código ISO en el control numérico con la seguridad de que no vamos a tener fallos. Aun así, también se ha realizado un ensayo en vacío para observar que la trayectoria de la herramienta es la correcta.

3.1.3. Introducción de parámetros de funcionamiento

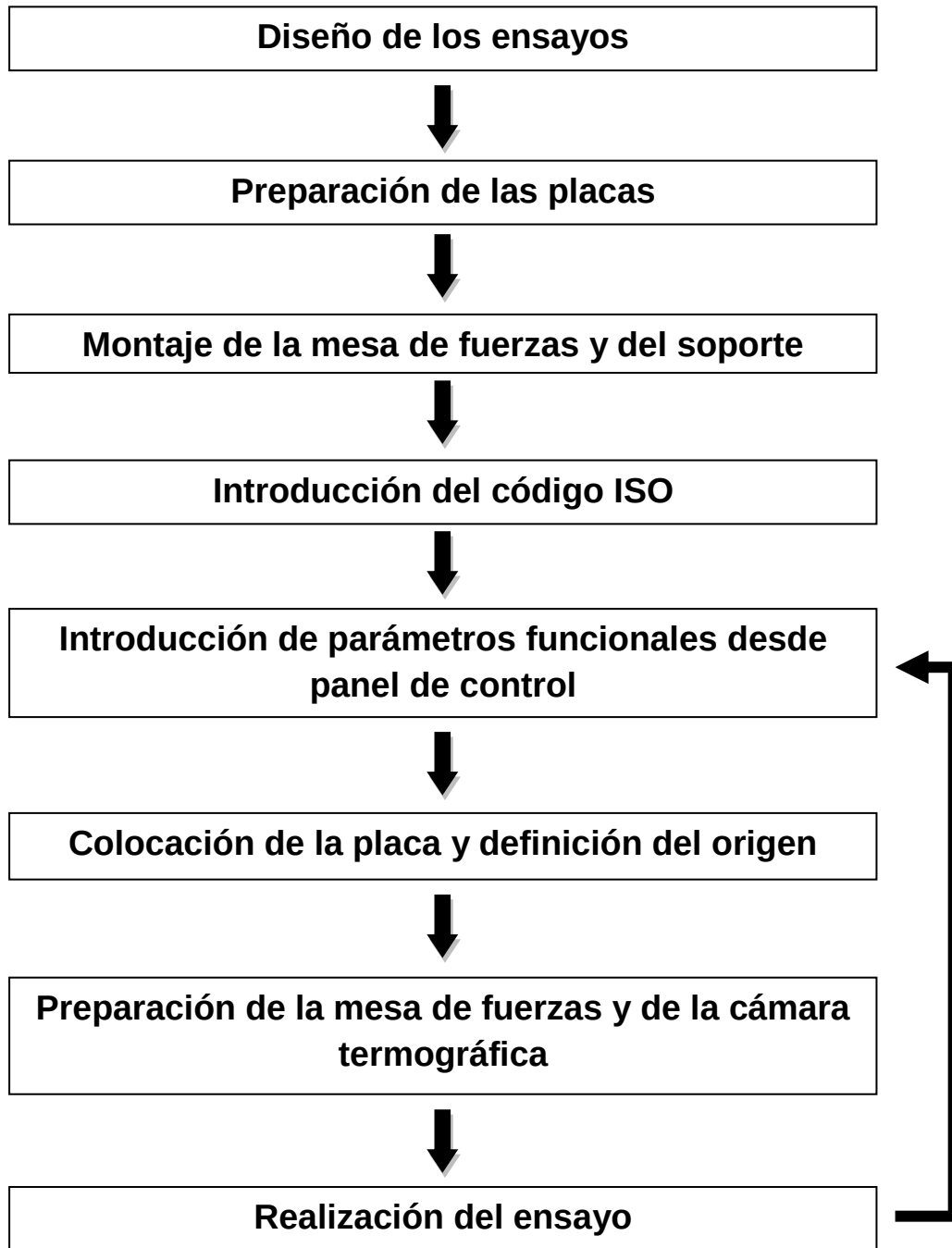
En el archivo generado por MatLab no se ha programado ni la velocidad de giro ni el sentido de giro del cabezal, ya que estos parámetros se irán introduciendo mediante el cuadro de mandos de la maquina CNC según el ensayo que se vaya a realizar.

3.2. Metodología

En este apartado se va a explicar detalladamente la metodología seguida para realizar el ensayo experimental. Se explicará paso a paso desde cómo preparar las placas hasta como cargar el código ISO en el centro de mecanizado. Esta metodología se repetirá variando las condiciones de cada uno de los ensayos.

Con esta explicación se pretende que se puedan reproducir con facilidad los experimentos aquí realizados por cualquier otra persona.

A continuación se muestra un esquema donde se indican los diferentes pasos a seguir desde el diseño de los ensayos hasta la realización propia del ensayo.



3.2.1. Preparación de la placa

Las placas utilizadas para los ensayos se han obtenido a partir de una placa de 1x1 m. Para cortar a partir de esta placa las pequeñas placas que van a ser deformadas se ha utilizado una sierra de calar. Para realizar el corte de manera correcta se ha fijado la placa a la mesa de trabajo con un gato y dibujado previamente sobre esta las medidas de las placas de 205x205 m.

Una vez cortadas las placas, se le dibujara una cuadrícula de 1 mm de tamaño con tinta permanente. Con esta cuadrícula se pretende observar después del proceso de deformación, como se han desplazado y deformado los diferentes puntos de esta cuadrícula.

3.2.2. Montaje de la mesa dinamométrica y del soporte

La mesa dinamométrica, está diseñada especialmente para ser utilizado en centros de mecanizado, por lo tanto se ha fijado a la mesa del centro con facilidad.

Una vez montada la mesa dinamométrica será montada encima el soporte con el cual se realizara la sujeción de la placa que va a ser deformada. Para este propósito la mesa tiene unos agujeros roscados a través de los cuales con ayuda de dos tornillos se ha fijado el soporte a la mesa.

De esta manera tanto el soporte como la mesa dinamométrica quedan fijos a la mesa del centro de mecanizado. En la siguiente imagen se puede observar el montaje acabado.

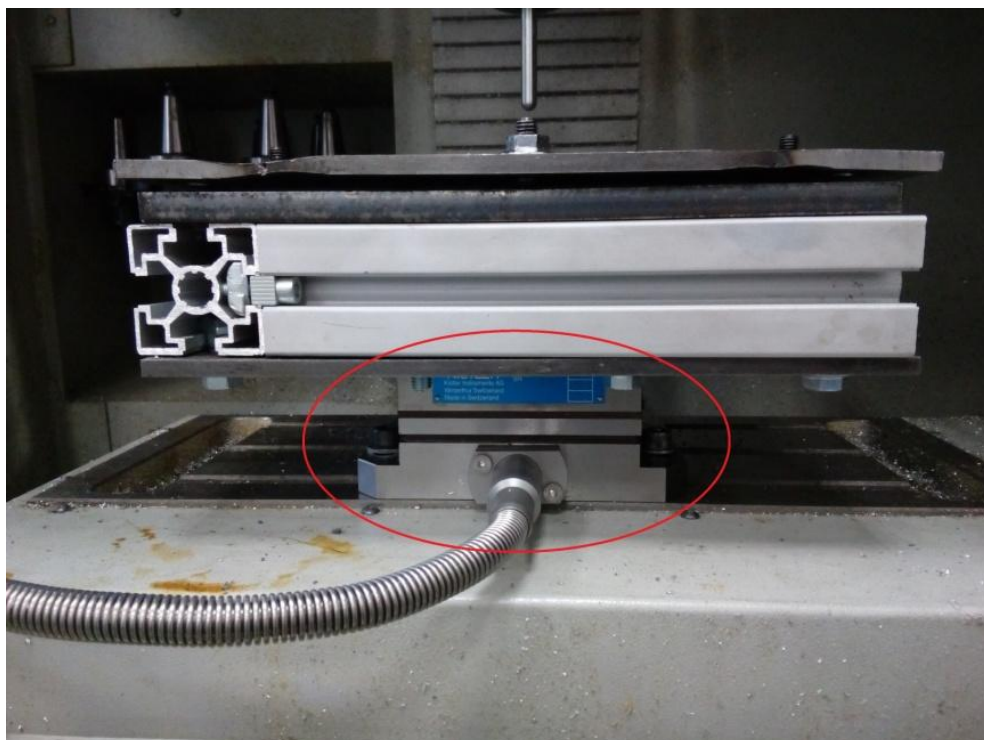


Ilustración 3.2 Fotografía de la mesa dinamométrica KISTLER montada

3.2.3. Introducción del código ISO

Con la ayuda del ordenador que tenemos conectado al centro de mecanizado se cargara el código ISO, diseñado y programado con antelación en el ordenador personal. Una vez que tenemos el código introducido, mediante la pantalla de comandos del centro de mecanizado se variaran los parámetros necesarios para cada uno de los diferentes ensayos.

3.2.4. Colocación de la placa y definición del origen de coordenadas

Una vez cargado el código ISO, el próximo paso es definir el origen de coordenadas con el que trabajara este código. Para ellos se ha decidió definir los ejes X e Y en el centro de la circunferencia de la matriz inferior, ya que sabemos que esta circunferencia tiene un diámetro de 140 mm y puede ser hallado su centro con facilidad. Si seleccionamos de esta manera la referencia, esta será idéntica para todas las placas que coloquemos.

Una vez tenemos seleccionados el origen de los ejes X e Y se debe realizar la colocación del eje Z. Para ello primero se debe realizar la colocación de la placa en el soporte de sujeción, ya que la referencia será tomada en la superficie de la placa una vez montada. Para montar la placa, esta se colocará entre la matriz inferior y superior del soporte de sujeción y se apretarán los diferentes tornillos que se encuentran a lo largo del borde de estas matrices. Hay que decir que para aumentar el agarre del soporte se ha incluido en la parte inferior de la matriz superior unas tiras de neopreno para evitar que la placa se deslice en el soporte durante el proceso de deformación.

Colocada la placa correctamente en el soporte de sujeción se puede proceder a definir el eje Z de coordenadas, el cual se tomará justo en la superficie de la placa colocada.

En la siguiente imagen podemos observar como quedaría la placa colocada en el soporte.

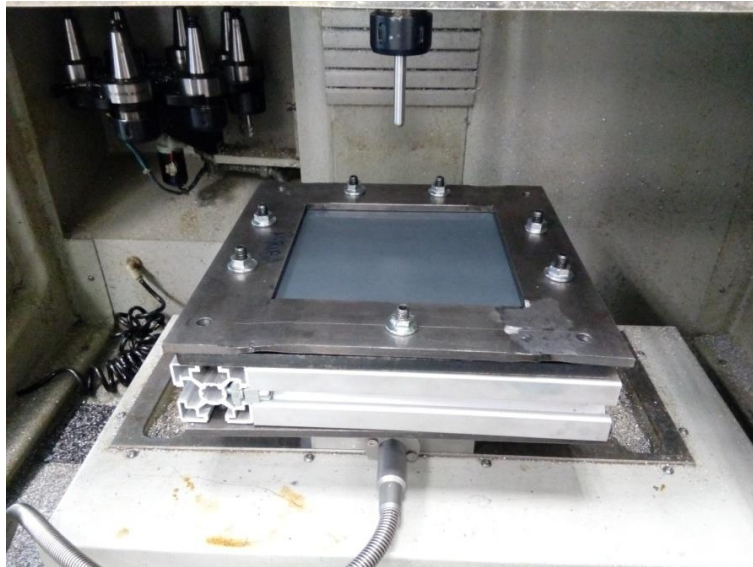


Ilustración 3.3 Fotografía del montaje experimental antes de realizar un ensayo

3.2.5. Preparación de la mesa dinamométrica y de la cámara termográfica

Antes de activar la inicialización del código ISO introducido en el centro de mecanizado se procederá a la preparación de los diferentes instrumentos de medida utilizados para tomar mediciones durante el proceso de deformación.

En primer lugar se colocara la cámara termográfica en un trípode de manera que esta enfoque y sea capaz de grabar todo el proceso de deformación. La cámara estará conectada a un ordenador con un software de grabación de video que guardará el video grabado durante el proceso.

También se debe de conectar correctamente todos los elementos de la mesa dinamométrica así como asegurarse de que las conexiones entre todos los elementos de los que consta el sistema de la mesa dinamométrica están correctamente conectadas. Una vez realizada esta comprobación se inicializará el software de toma de datos del ordenador conectado a la mesa.

Por último se activará la grabación de video y la toma de datos de la mesa dinamométrica, justo antes de activar el centro de mecanizado y empezar el proceso de deformación incremental.

3.3. Diseño de los ensayos

Con los diferentes ensayos experimentales que se van a realizar se pretende observar la influencia de diferentes variables, sobre la forma finalmente obtenida mediante el proceso de deformación. Las variables que se han tenido en cuenta son las siguientes:

- Material del punzón (acero y aluminio).
- Velocidad de giro del cabezal portaherramientas.
- Sentido de giro del cabezal portaherramientas.

Debido a que tenemos tres variables, dos de ellas que pueden tomar 3 valores diferentes y una de ellas solo dos, si se quisieran llevar a cabo todas las posibilidades se tendría un número excesivo de ensayos. Debido a razones de tiempo y de material se ha decidido reducir el número de experimentos que se van a llevar a cabo, utilizando un arreglo ortogonal de Taguchi para diseñar la tabla de experimentos.

La tabla de experimentos inicial ha quedado de la siguiente forma:

Nº ensayo	Velocidad de giro (rpm)	Sentido de giro	Material del punzón
1	0	0	Acero
2	0	0	Aluminio
3	1000	M03	Acero
4	1000	M04	Aluminio
5	2000	M03	Aluminio
6	2000	M04	Acero

Tabla 3.1 Tabla inicial de diseño de ensayos

El primer ensayo que se llevo a cabo fue el número 6 en el cual la velocidad de giro es de 2000 rpm, ya que se sospechaba que a esta velocidad de giro tan alta

las temperaturas alcanzadas en el material superarían la temperatura de transición vítrea del PVC, la cual se encuentra en torno a unos 80 °C.

Al realizar el ensayo se pudo observar mediante la cámara termográfica que esta temperatura alcanzada era mucho mayor de 80 °C y que el material empezaba a quedarse pegado al punzón, hasta que finalmente la pieza falló a los pocos pasos incrementales en el eje Z. El resultado del ensayo se puede observar en las siguientes imágenes.

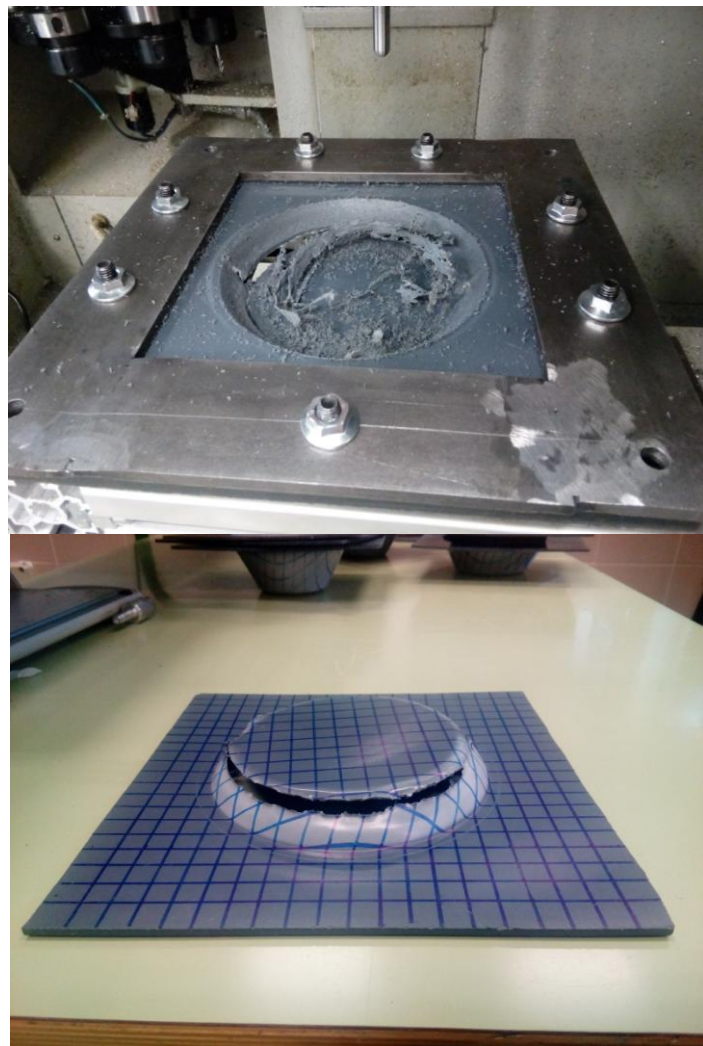


Ilustración 3.4 Fotografía del resultado fallido en el ensayo 6 a 2000 rpm usando acero

Debido a que estos resultados son inadmisibles se decidió rediseñar nuestra tabla de experimentos y reducir las velocidades de giro de los ensayos. Las velocidades finalmente seleccionadas son: velocidad nula, 500 rpm y 1000 rpm.

Se decidió empezar con el ensayo utilizando el punzón de acero y una velocidad de giro de 500 rpm para poder ver si los resultados obtenidos eran aceptables o se producía el fallo de la chapa.

Al realizar el ensayo, el proceso de deformación se realizaba completamente obteniendo la geometría requerida, pero la temperatura alcanzada seguía siendo lo suficientemente alta para que en algunas zonas el material quedase adherido al punzón, obteniendo un resultado inaceptables. El resultado de este ensayo se puede observar en la siguiente imagen:



Ilustración 3.5 Fotografía del resultado del ensayo 3 a 500 rpm usando acero

Debido al resultado de este ensayo se decidió volver a cambiar las velocidades de giro y utilizar velocidad nula, 250 rpm y 500 rpm.

Por lo que nuestra tabla de experimentos quedo finalmente de la siguiente forma:

Nº ensayo	Velocidad de giro (rpm)	Sentido de giro	Material del punzón
1	0	0	Acero
2	0	0	Aluminio
3	500	M03	Acero
4	500	M04	Aluminio
5	250	M03	Aluminio
6	250	M04	Acero

Tabla 3.2 Tabla definitiva de ensayos

3.4. Resultados de los ensayos experimentales

En este capítulo se mostraran los resultados obtenidos durante la realización del ensayo, los cuales son la fuerza y la temperatura en función del tiempo. Además, una vez que tenemos la chapa deformada mediremos el espesor, la geometría final del perfil y la rugosidad superficial mediante diferentes metodologías que serán explicadas con detenimiento en los siguientes apartados.

3.4.1. Geometría obtenida

La geometría obtenida después del proceso de deformación es la siguiente:

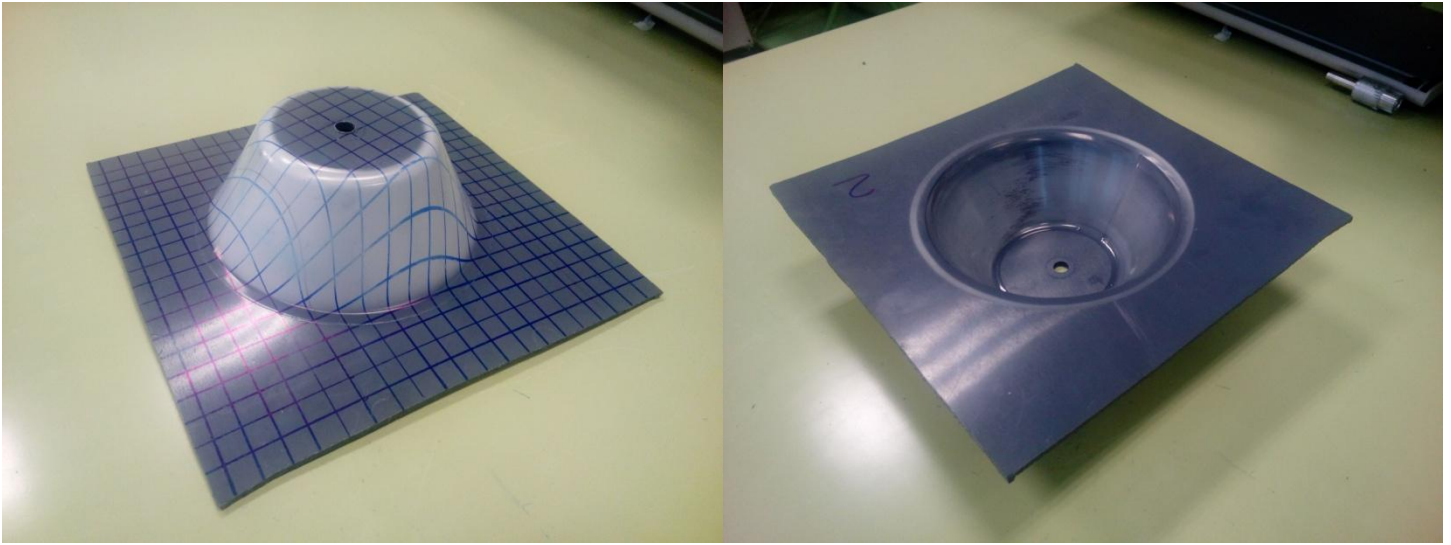


Ilustración 3.6 Forma obtenida en el ensayo nº2

Si se analiza desde arriba la chapa, se puede observar que se ha producido una torsión a lo largo del tronco de cono, ya que en la base inferior del tronco de cono hay un ángulo de giro con respecto a la parte superior de la chapa que se puede medir gracias a la cuadrícula que se ha dibujado en la chapa antes de realizar la deformación.

En la siguiente imagen se puede apreciar esta torsión y como puede ser medido este ángulo de torsión:

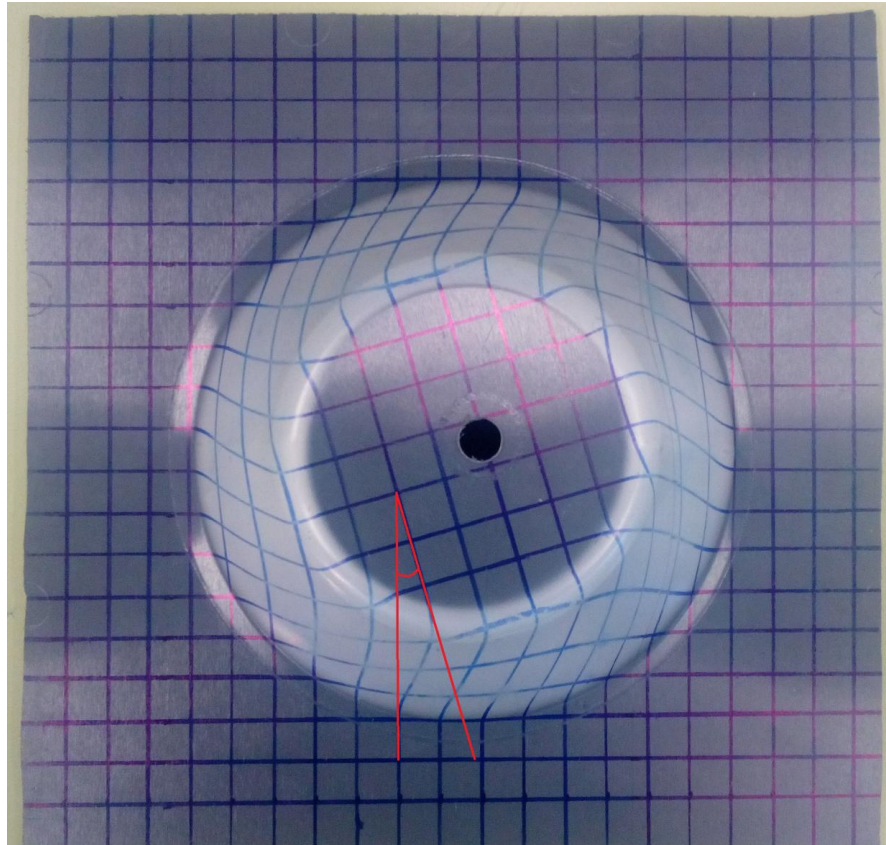


Ilustración 3.7 Efecto de la torsión

Midiendo este ángulo para cada uno de los ensayos realizados obtenemos los siguientes ángulos de torsión:

ENSAYO	ÁNGULO TORSIÓN
1	17°
2	16°
3	17°
4	15°
5	15°
6	17°

Tabla 3.3 Angulo de torsión para los diferentes ensayos

3.4.2. Perfil

Para medir la geometría que se ha obtenido después del proceso de deformación se han medido una nube de puntos a lo largo de un eje en X. Para realizar estas medidas se ha realizado un agujero en la base inferior del cono, para

poder fijar la chapa deformada a la mesa de la máquina fresadora. Además en el portaherramientas se ha montado un reloj comparador.

El montaje del método de medida se puede observar en la siguiente imagen:

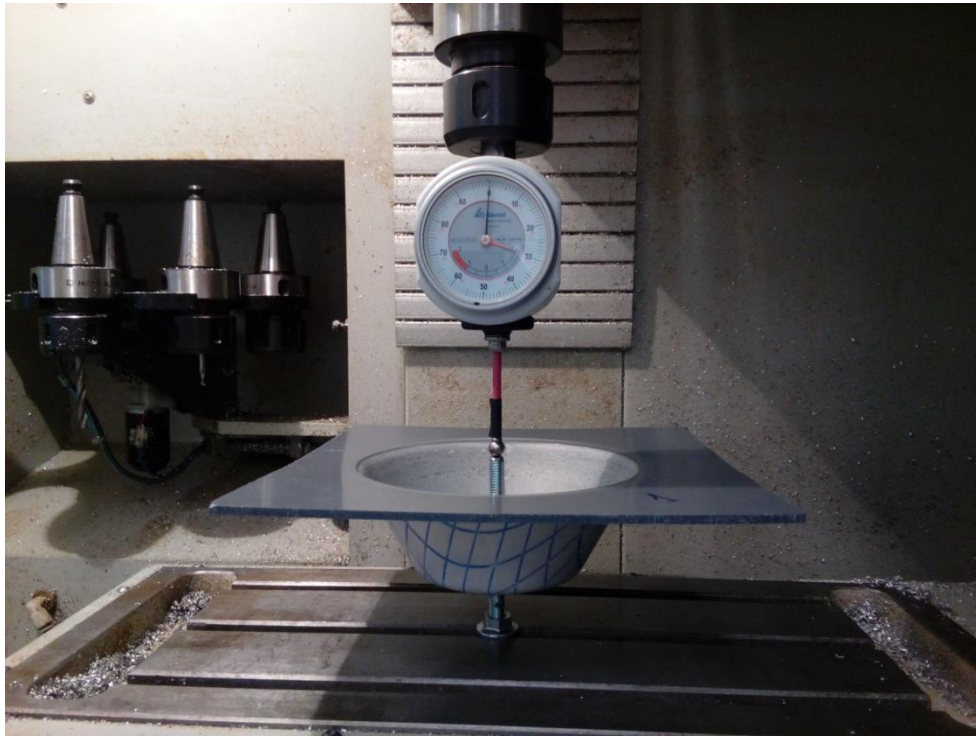


Ilustración 3.8 Fotografía del procedimiento de medida para la obtención del perfil

Para empezar el proceso de medida el primer paso es colocar el origen de coordenadas del control numérico. El origen de coordenadas se ha establecido en la punta de la vara roscada que se ha fijado a la mesa, para que este origen de coordenadas sea el mismo para todas las chapas deformadas que se coloquen en la mesa.

Una vez definido el origen, vamos moviendo el reloj comparador a lo largo del eje X, parando cada cierta distancia para bajar la posición en Z hasta que el reloj comparador marque el contacto de la esfera del reloj y la chapa. Una vez que sabemos que la esfera del reloj está en contacto con la chapa, apuntaremos el valor de X y Z que nos da la pantalla del control numérico. Obteniendo así la nube de puntos en Z que define el perfil obtenido después de la formación.

Se ha repetido este proceso de medida para cada una de las chapas deformadas obtenidas en los diferentes ensayos y se han almacenado los datos obtenidos en una hoja Excel para poder procesarlos.

En la siguiente gráfica se ha representado cada uno de los perfiles obtenidos para los diferentes ensayos, además de la geometría teórica que queríamos definir cuando se definió el problema.

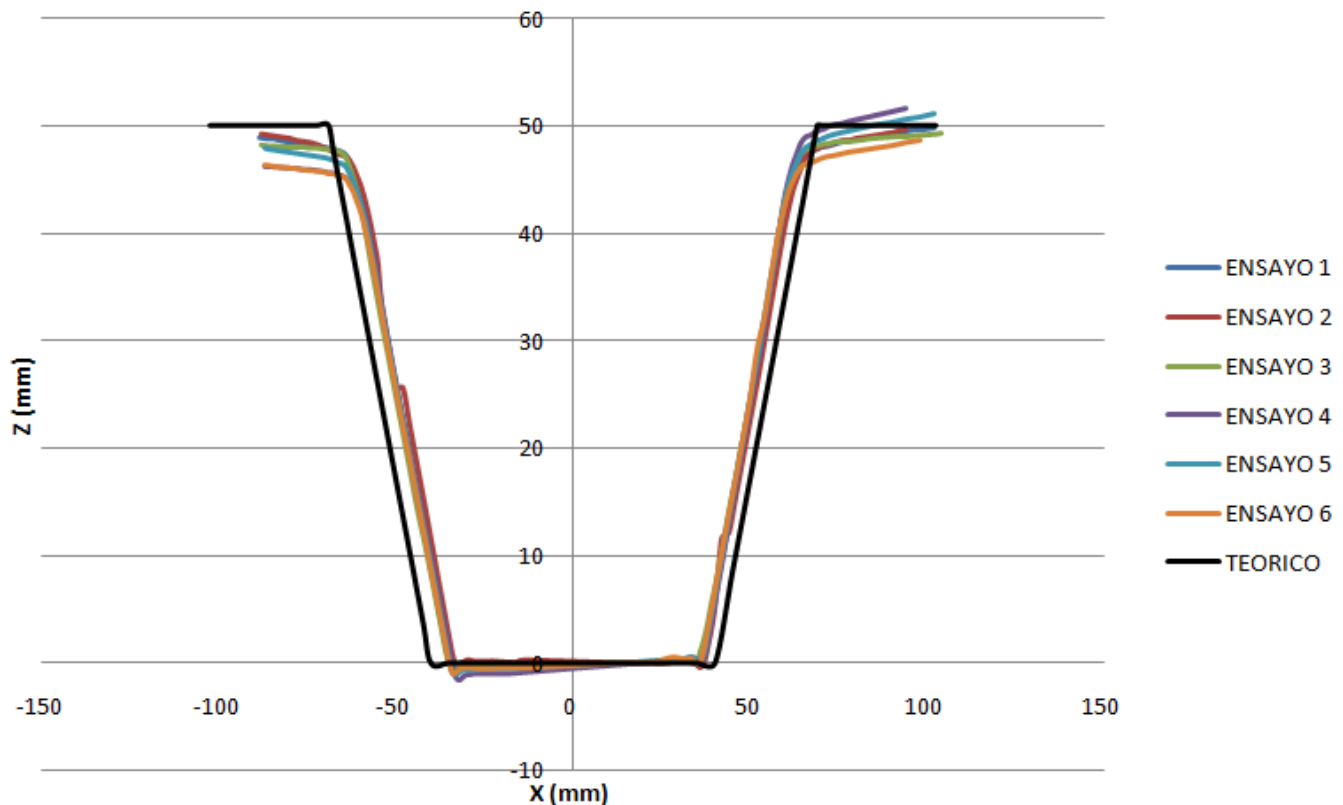


Ilustración 3.9 Gráfica del perfil obtenido en los diferentes ensayos

Si analizamos la gráfica anterior se puede ver que se consiguen perfiles muy parecidos para todos los ensayos, tanto en la zona de la base del tronco de cono como en la pendiente de este. Sin embargo, en la zona superior se pueden observar ciertas diferencias, esto puede ser debido a que la colocación de la sujeción de la chapa se ha realizado manualmente apretando las tuercas a mano. Esta diferencia en la fuerza que aplicamos en la sujeción, puede ser la explicación de las diferencias en la parte superior de la chapa.

Además, si se compara la geometría obtenida en los ensayos con la geometría teórica se puede observar que la deformación en los ensayos es menor.

Este suceso es debido a la recuperación elástica que sufre el material. Para solucionar este problema se podría realizar un sobredimensionado de la trayectoria seguida por el punzón que realiza la deformación, para que una vez que la chapa sufra la recuperación elástica se obtengan las dimensiones que realmente se quieren obtener.

3.4.3. Rugosidad

Para poder comparar los diferentes acabados superficiales obtenidos mediante los diferentes ensayos realizados se ha realizado una medición de la rugosidad, con la ayuda de un rugosímetro. En concreto se ha utilizado un rugosímetro de la marca MITUYOTO modelo SJ-210, como el que podemos observar en la siguiente imagen:



Ilustración 3.10 Rugosímetro MITUYOTO modelo SJ-210

Se han realizado 3 medidas para cada una de las placas deformadas, en diferentes zonas de la superficie interior del tronco de cono. Además, se han

realizado otras tres medidas de una placa de PVC sin deformar para poder tener el valor de la rugosidad del material antes de realizar la deformación.

El montaje para realizar la medición de la rugosidad ha quedado de la siguiente forma:



Ilustración 3.11 Montaje para medición de la rugosidad

Según el manual de instrucciones del rugosímetro se deben seleccionar diferentes longitudes de muestreo dependiendo del valor de rugosidad obtenido. Por ello se ha realizado una primera medida estimatoria en cada uno de las placas deformadas. De esta forma se ha obtenido que para las placas en las que se ha utilizado el punzón de aluminio se obtienen valores de R_a entre 0.1 y $1 \mu\text{m}$, para la que se obtiene una longitud de muestreo de 0.8 mm . Por otro lado, para las placas que han sido deformadas con el punzón de acero se obtienen valores de R_a mayores, entre 2 y $10 \mu\text{m}$, para los que el manual propone una longitud de muestreo de 2.5 mm

El aparato realiza automáticamente una medida de la rugosidad a lo largo de la distancia de muestreo configurada, calculando automáticamente el valor de R_a que corresponde al valor medio de la rugosidad a lo largo de la línea medida. Para los diferentes ensayos se han obtenido los siguientes valores de R_a .

Ensayo	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ra media (μm)
1 (acero 0 rpm)	6.605	7.025	6.366	6.665
2 (aluminio 0 rpm)	0.304	0.305	0.350	0.320
3 (acero 500 rpm)	2.850	3.278	2.832	2.987
4 (aluminio 500 rpm)	0.541	0.697	0.511	0.583
5 (aluminio 250 rpm)	0.389	0.367	0.370	0.375
6 (acero 250 rpm)	4.125	4.450	4.586	4.387
PVC	0.686	0.700	0.766	0.717

Tabla 3.4 Valor de Ra para los diferentes ensayos

Estudiando los resultados, reflejados en la tabla anterior, se puede observar como con el punzón de aluminio se consigue mejor acabado superficial que utilizando el punzón de acero. Comparando el perfil de rugosidad obtenido usando el punzón de acero o aluminio con giro nulo del cabezal, obtenemos la siguiente gráfica.

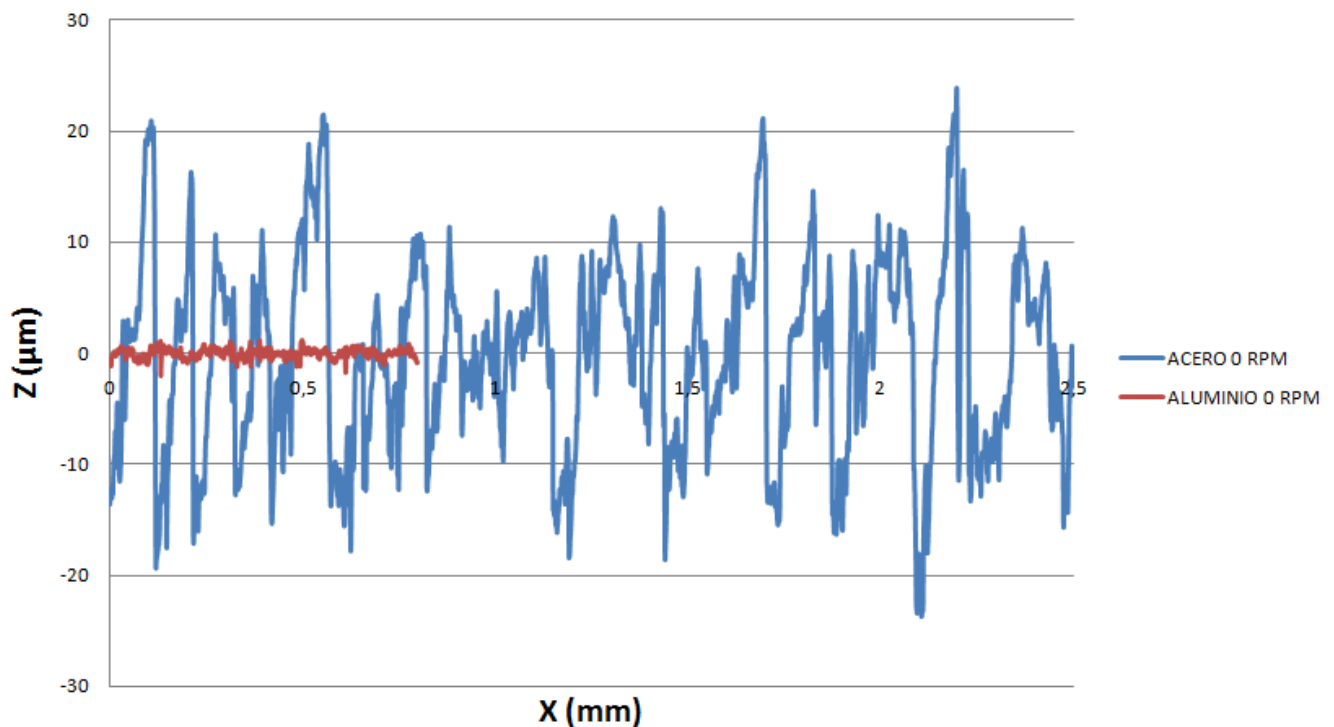


Ilustración 3.12 Comparación del perfil de rugosidad obtenido con diferente material del punzón

Se puede apreciar como con el aluminio se obtiene un acabado superficial mucho mejor que con el acero. Incluso, con el punzón de aluminio con velocidad de giro de 0 y 250 rpm se consigue un valor menor de rugosidad que para el propio PVC antes de la deformación.

Si nos fijamos en los resultados de rugosidad obtenidos con el punzón de acero a diferentes velocidades de giro, se observa un acabado superficial mejor utilizando una velocidad de giro mayor. En cambio, cuando utilizamos el punzón de aluminio surge el efecto contrario, el acabado superficial empeora cuando aumentamos la velocidad de giro. Esta diferencia del comportamiento en el acabado superficial podría estar debida al tipo de rozamiento existente entre el punzón y la placa, que en el caso del aluminio con el PVC sería un rozamiento de tipo deslizante, mientras que entre el acero y el PVC tendríamos un rozamiento de tipo adhesivo.

3.4.4. Fuerza

Como se ha explicado anteriormente se ha utilizado una mesa dinamométrica para tomar medidas de la fuerza a lo largo del proceso de deformación, obteniéndose un archivo de fuerzas para cada uno de los ensayos. Para poder graficar los datos obtenidos mediante la mesa se ha generado un código en MatLab que elimina los primeros valores que se escriben desde que se enciende la adquisición de datos por el ordenador, hasta que comienza realmente el proceso de deformación. Además, también se creará un vector tiempo, sabiendo que la mesa toma 20 datos por segundo, una vez obtenemos en diferentes vectores las fuerzas y su correspondiente tiempo podemos graficar fácilmente los resultados utilizando la función plot. El código está incluido en el anexo y tiene como nombre **lectorfuerzas.m**.

Para poder observar la forma general de las fuerzas en cada uno de los ejes se van a graficar las fuerzas para el ensayo 1, que corresponde a aluminio sin girar.

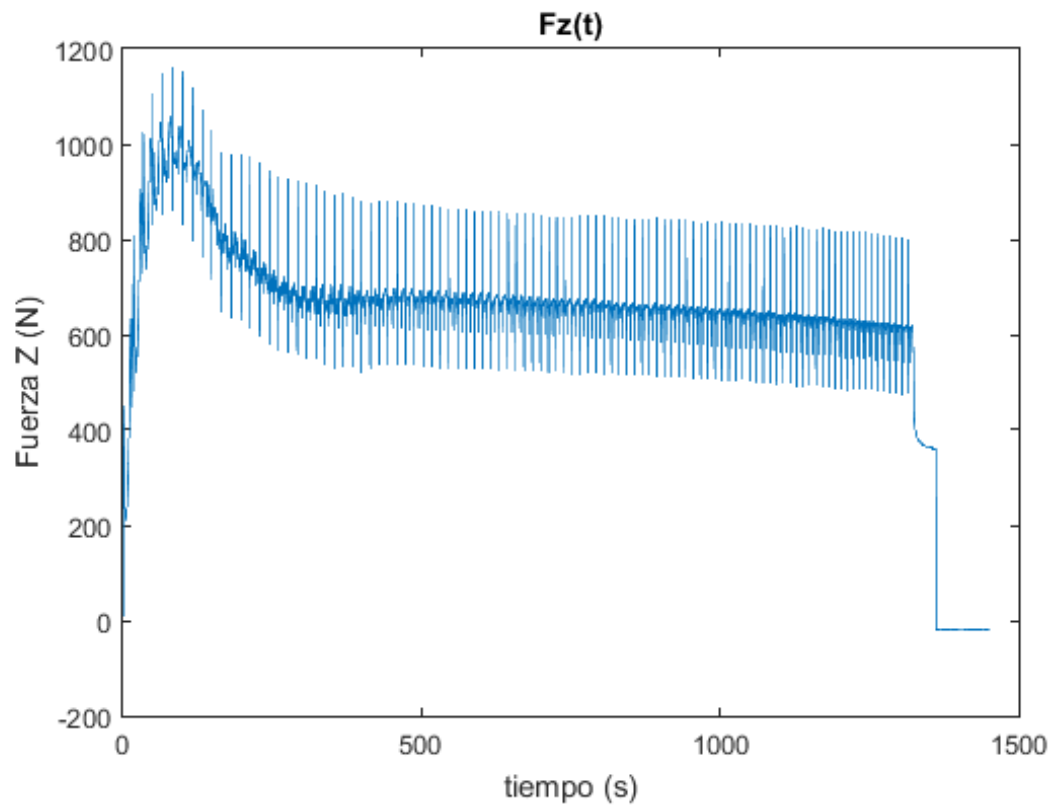


Ilustración 3.13 Fuerza en el eje Z a lo largo del tiempo

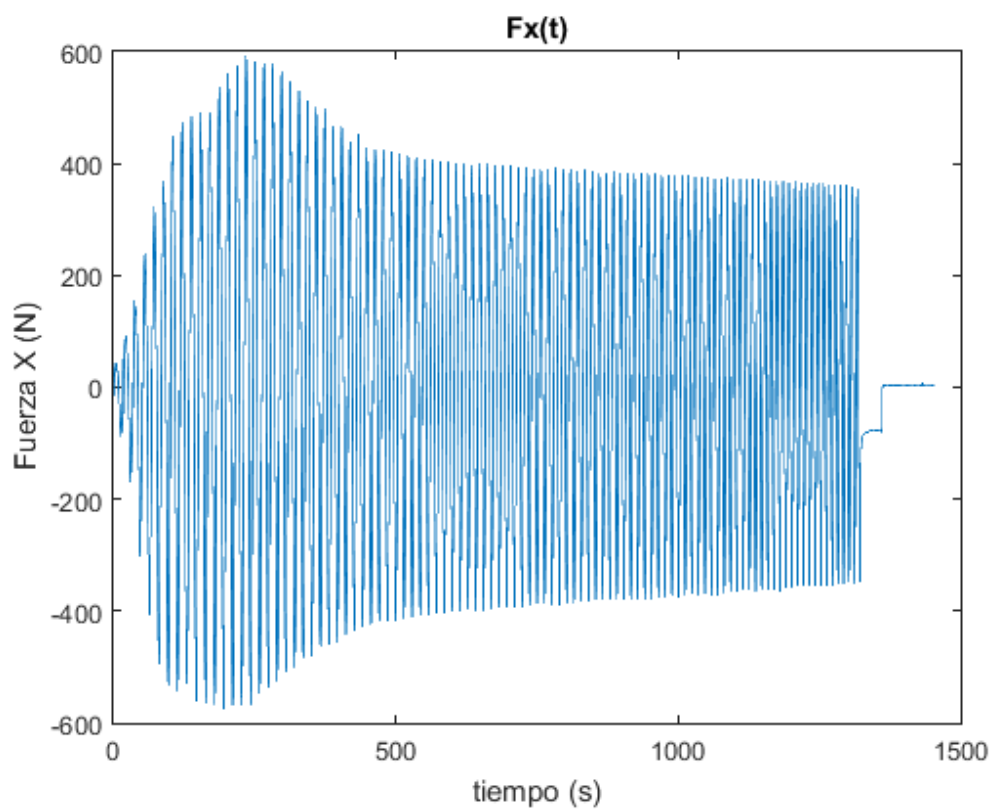


Ilustración 3.14 Fuerza en el eje X a lo largo del tiempo

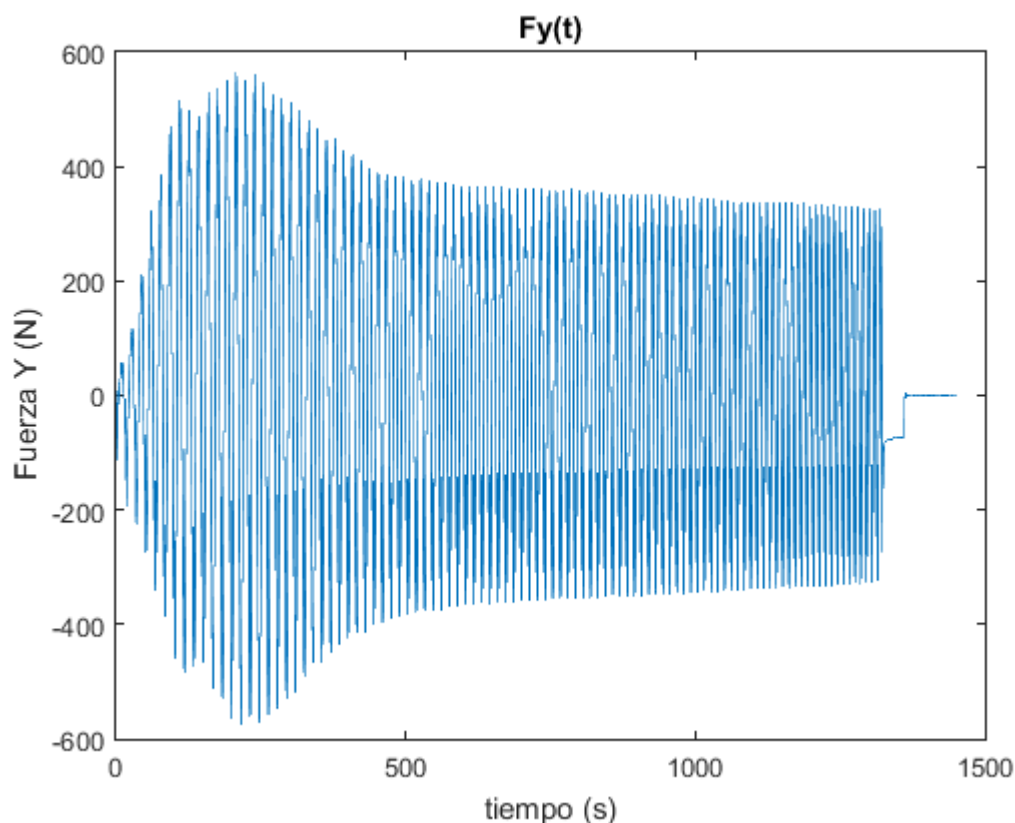


Ilustración 3.15 Fuerza en el eje Y a lo largo del tiempo

Se observa que tanto las fuerzas en X como en Y son de naturaleza periódica, los valores de fuerza oscilan con una amplitud determinada en torno a 0 a lo largo del tiempo. Esto es debido a que la trayectoria seguida por el punzón en el plano XY está formada por circunferencias de diferente radio.

Para poder realizar una comparación más visual de las fuerzas en el plano obtenidas en cada uno de los ensayos, se ha decidido procesar las gráficas de fuerza en los ejes X e Y para obtener los puntos máximos de fuerza a lo largo del tiempo. Este es el valor que nos interesa realmente de la fuerza en estos ejes ya que cuando en la gráfica estas fuerzas obtienen un valor negativo se refieren a que el sentido del vector de fuerza está en contraposición con el eje de medida de la mesa dinamométrica.

Para realizar este procesado se ha escrito un código en MatLab, el cual está incluido en el anexo con el nombre **maxdatos.m**, que selecciona todos los máximos de una gráfica y los guarda con su respectivo valor de tiempo. Debido a que la mesa dinamométrica toma una gran cantidad de datos y a la existencia de falsos máximos,

se debe aplicar el código a cada una de las gráficas de fuerza varias veces hasta obtener un resultado aceptable, que realmente corresponda con los valores máximos de la gráfica.

Una vez aplicado este código de MatLab se han pasado los datos a una hoja Excel para poder trabajar con los datos más cómodamente.

A continuación se mostrarán las gráficas de los máximos de la fuerza en X y en Y para los diferentes ensayos realizados.

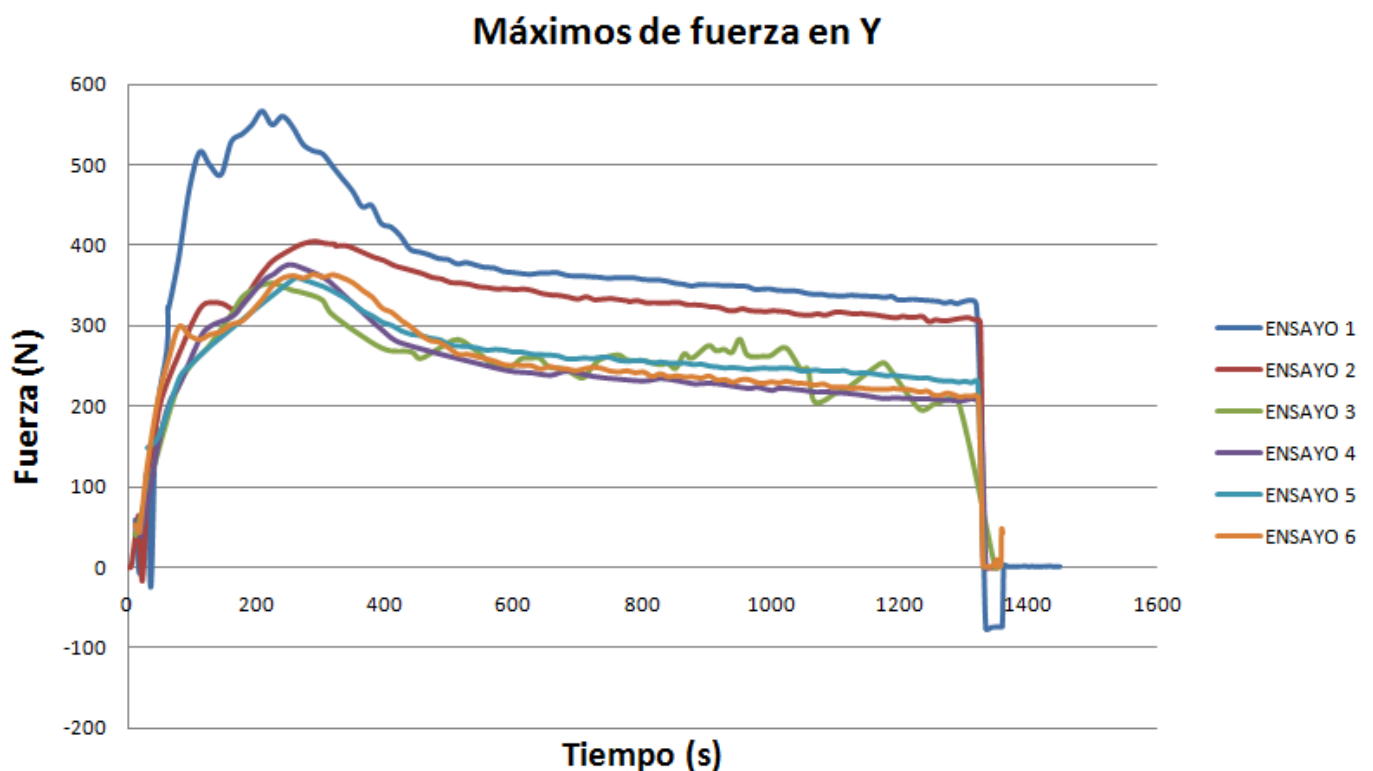


Ilustración 3.16 Fuerza máxima en el eje Z en los diferentes ensayos

Se observa como las fuerzas son mayores en los ensayos donde la velocidad de giro del cabezal portaherramientas es nula, ya que al no girar la herramienta la temperatura alcanzada es menor y es necesaria más fuerza para poder realizar la deformación de la placa de PVC.

Si nos fijamos en los ensayos en los que se aplica una velocidad de giro al punzón, podemos ver que para estos ensayos las fuerzas están en torno al mismo valor, pero si ampliamos la gráfica se puede ver como para los ensayos en los que la

herramienta gira a una velocidad de 500 rpm la fuerza máxima necesaria es ligeramente menor que para los ensayos de velocidad 250 rpm.

Hay que decir que si se observa la forma de los máximos de la fuerza en el ensayo 3, esta sufre muchas fluctuaciones siendo los máximos de la fuerza de una forma diferente a los demás ensayos realizados. Esta diferencia en la forma de la fuerza puede ser causada a que en este ensayo debido se produjo la adherencia en ciertas de material en el punzón.

Por otro lado, en la gráfica de la fuerza en Z se puede observar que al principio del proceso de deformación hay un pico de fuerza y que después la fuerza se va estabilizando conforme se va alcanzando la temperatura de trabajo para el ensayo.

Por otro lado es interesante estudiar la influencia de la velocidad de giro sobre la fuerza en el eje Z necesaria para realizar en el proceso de deformación. Para ello se ha graficado esta fuerza para las diferentes velocidades de giro, primero para el acero y luego para el aluminio.

Para el acero los resultados se pueden observar en el siguiente gráfico:

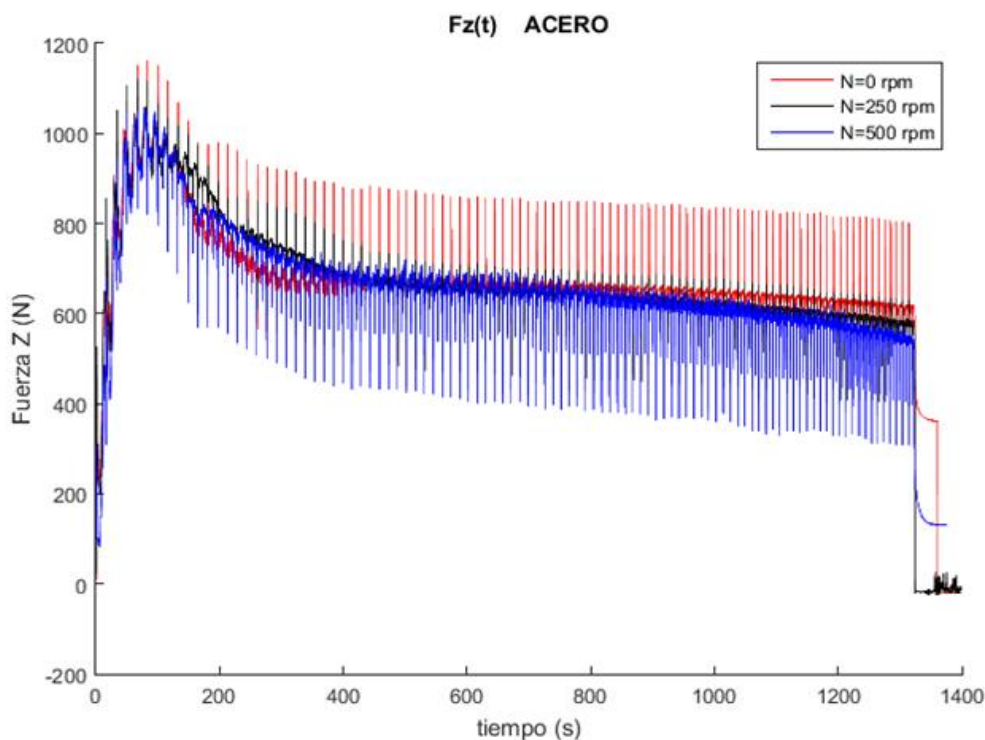


Ilustración 3.17 Fuerza en el eje Z en los ensayos con punzón de aluminio

Para el aluminio los resultados son los siguientes:

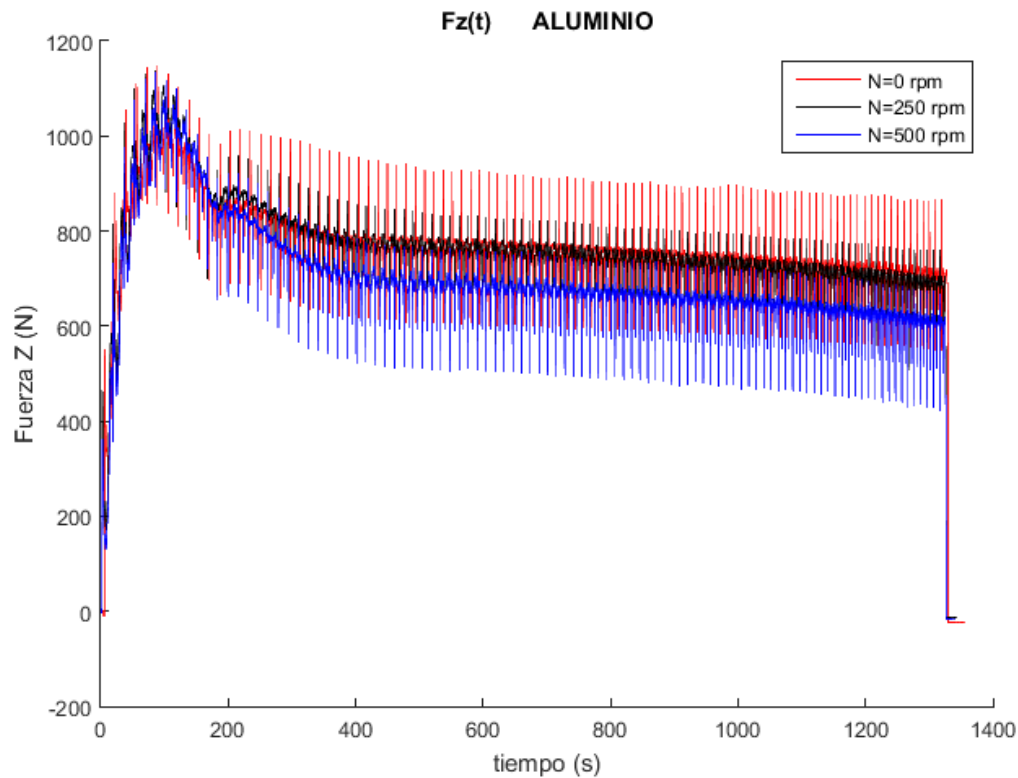


Ilustración 3.18 Fuerza en el eje Z en los ensayos con punzón de acero

Observando ambas gráficas se puede llegar a la conclusión de que si aumentamos la velocidad de giro, la temperatura de trabajo también aumenta y la fuerza necesaria para realizar la deformación también disminuye.

Finalmente para poder comparar la influencia del material del punzón sobre las fuerzas se graficaran las fuerzas en Z para los ensayos a 0 rpm y usando acero y aluminio.

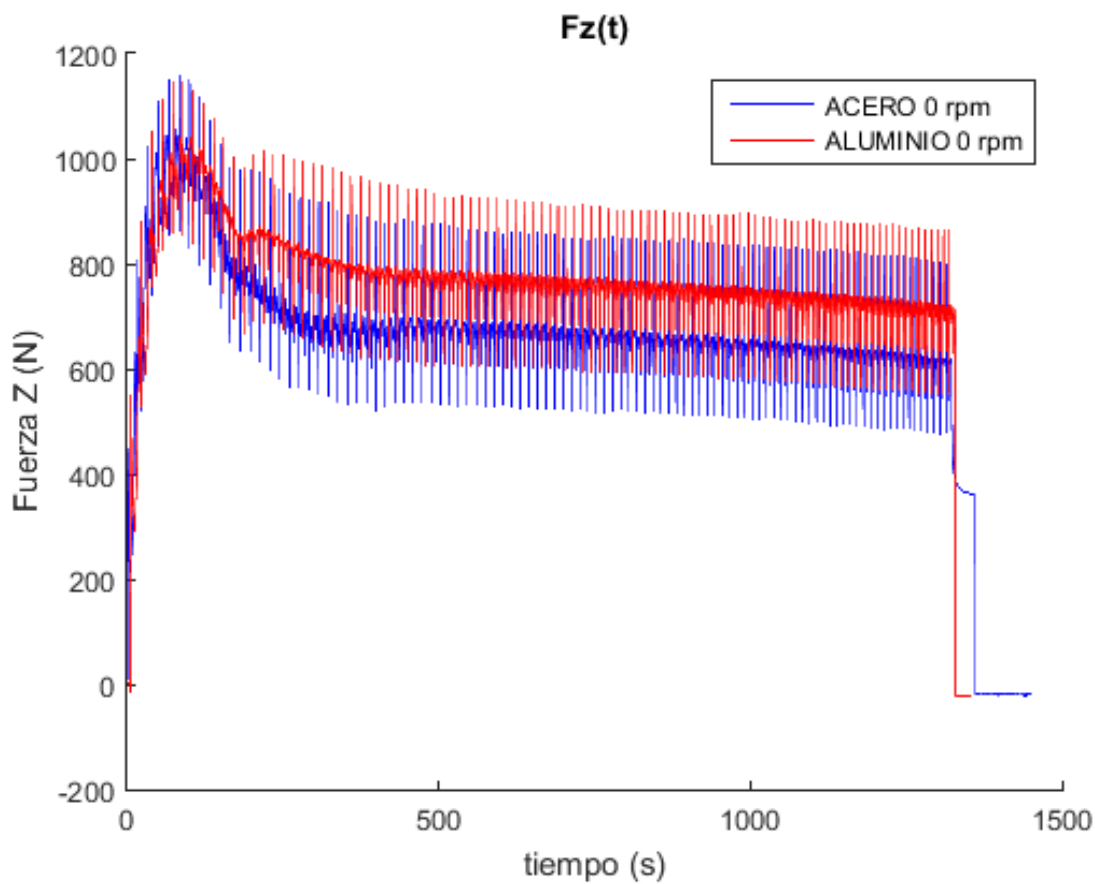


Ilustración 3.19 Comparación fuerza eje Z usando punzón de aluminio y de acero

Se puede ver como con el punzón de acero la fuerza necesaria para realizar la deformación es menor, ya que se alcanza mayor temperatura en el punto de contacto. Este hecho puede ser debido a la mayor conductividad térmica del acero frente al aluminio, lo que provoca que la disipación de calor en la zona de contacto entre el punzón y la chapa sea más lenta, alcanzando esta zona mayores temperaturas cuando usamos acero.

3.4.5. Temperatura

A partir de la cámara termográfica se ha obtenido un video de cada ensayo, en los cuales se puede observar la distribución de temperaturas en la chapa a lo largo de todo el proceso de deformación. En la siguiente imagen podemos ver una fotografía tomada por la cámara en la cual se puede observar cual es la temperatura máxima en un momento dado del proceso.



Ilustración 3.20 Imagen de un ensayo tomada con la cámara termográfica

Se han procesado todos los videos obtenidos y se ha obtenido la temperatura máxima obtenida en cada paso incremental en Z y han sido graficados en la siguiente gráfica:

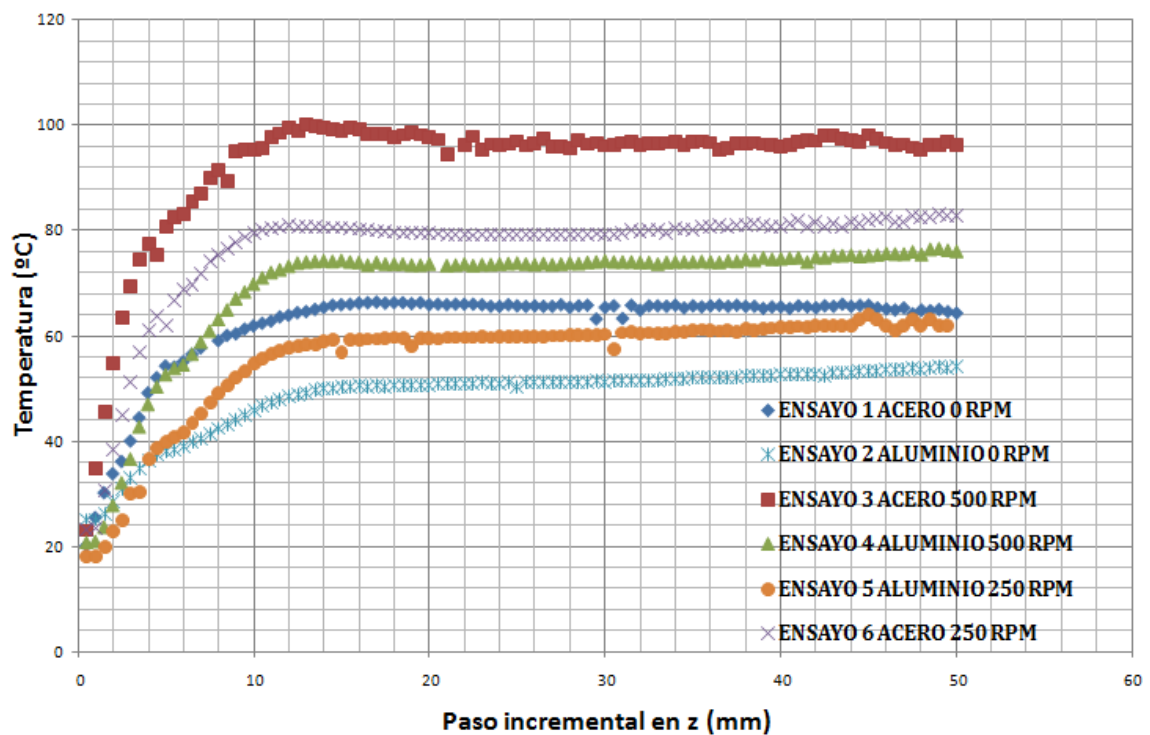


Ilustración 3.21 Temperatura en función de la posición en Z del punzón

Para poder observar mejor la influencia del material en la temperatura, se ha decidido graficar por un lado la temperatura de los ensayos usando el punzón de acero y por otro la temperatura de los ensayos con el punzón de aluminio.

De esta manera para el punzón de acero tenemos la siguiente grafica:

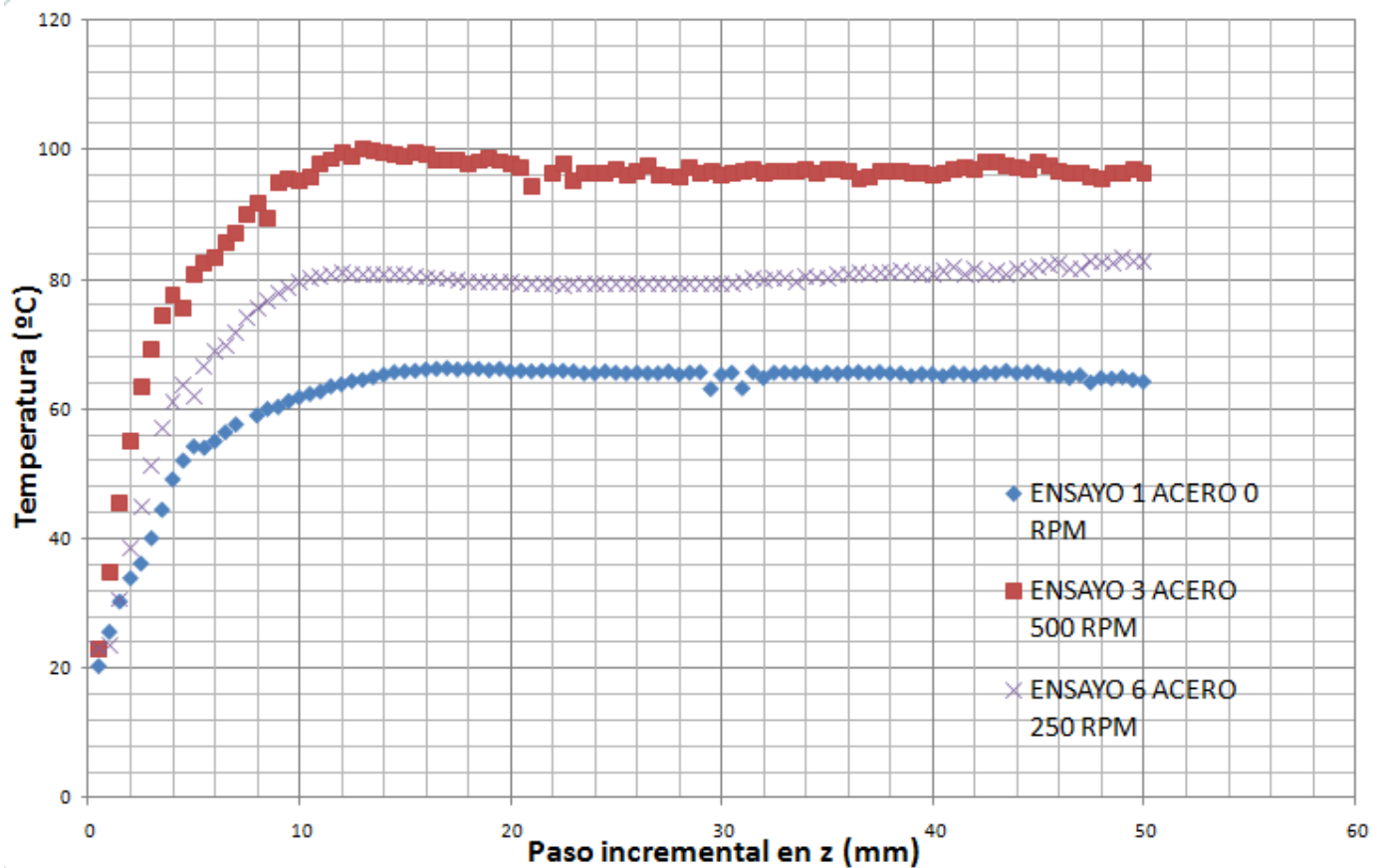


Ilustración 3.22 Temperatura en función de la posición en Z del punzón utilizando acero

De la misma forma para el punzón de aluminio:

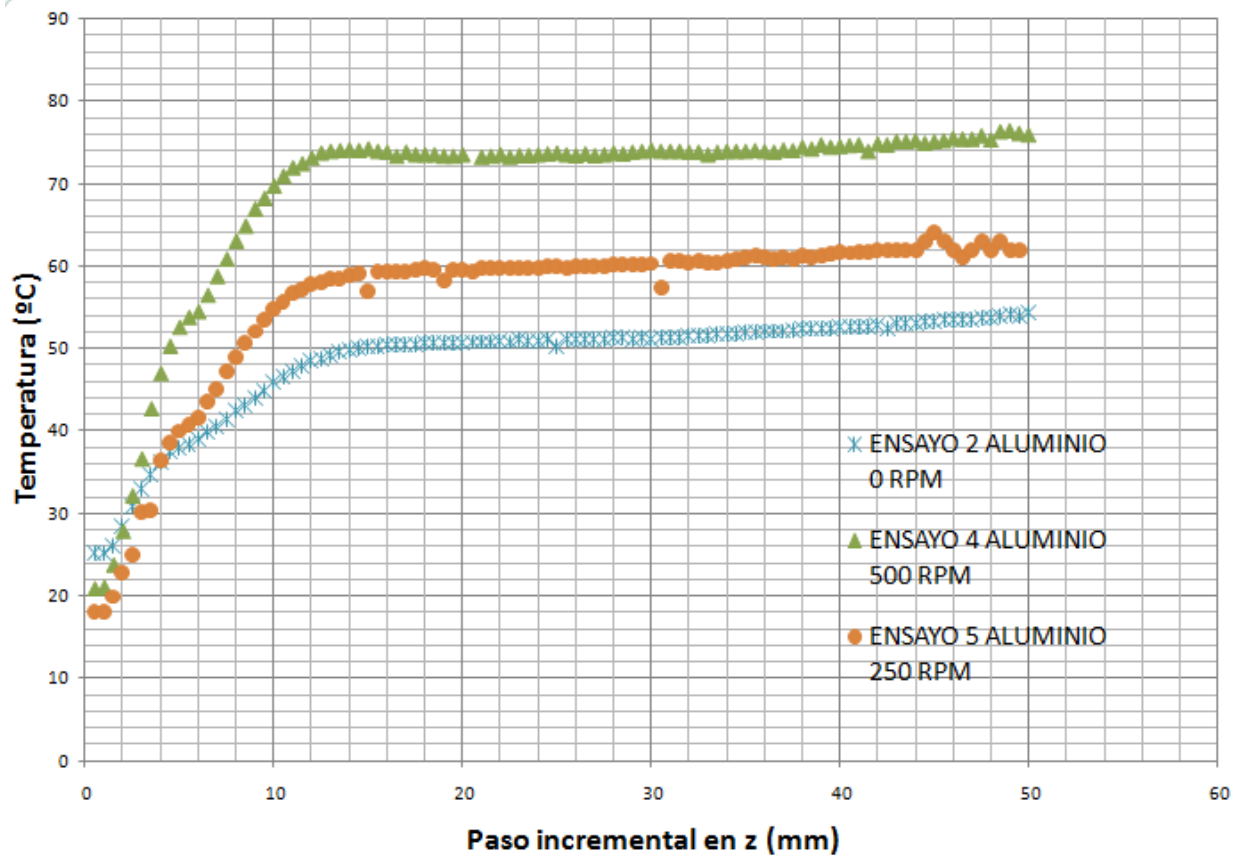


Ilustración 3.22 Temperatura en función de la posición en Z del punzón utilizando aluminio

Si estudiamos las gráficas anteriores, como era de esperar conforme se va aumentando la velocidad de giro, debido al aumento del rozamiento entre el punzón y la herramienta, la temperatura alcanzada en el punto de contacto también aumenta.

Además se puede observar que para una misma velocidad de giro, utilizando el punzón de aluminio se alcanzan temperaturas inferiores a las alcanzadas utilizando el punzón de acero. Este hecho, como se ha comentado en el apartado de fuerzas, puede ser debido a la mayor conductividad térmica del aluminio, que permite la disipación de calor con más facilidad por lo que la temperatura alcanzada es menor.

Si analizamos el ensayo 3, en el cual se utiliza el punzón de acero con una velocidad de giro de 500, el hecho de que en ciertas zonas el material quedaba adherido al punzón se puede explicar debido a que la temperatura alcanzada en la

zona de contacto, llega a unos 100 °C aproximadamente. Esta temperatura supera la temperatura de transición vítrea del PVC que es de unos 80 °C aproximadamente, a partir de la cual el PVC tiene un comportamiento que se encuentra a medio camino entre el estado sólido y líquido.

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE FEM

En este capítulo se hablara del desarrollo de un modelo para resolver el problema de deformación incremental planteado anteriormente, se explicará detalladamente cómo se ha configurado este modelo y se mostraran los diferentes resultados obtenidos.

Para implementar el modelo se ha trabajado con el software ABAQUS ya que es un programa muy potente y de alta aplicación en el sector ingenieril, debido principalmente a que trabaja tanto con solver explícito como implícito, ofreciendo un amplio abanico de problemas que se pueden resolver mediante este software.

4.1. Creación del modelo

Antes de lanzar una simulación en el software ABAQUS es necesario definir el problema, se deben definir las geometrías que interactuaran entre sí, definir el material utilizado en cada una de las geometrías, el tipo de contacto entre ellas y las condiciones de contorno entre otros parámetros. Todos estos parámetros serán tratados a continuación uno por uno detenidamente.

4.1.1. Creación de la geometría

En el modelo que se ha creado existen tres geometrías diferentes. La primera de ellas es el trozo de chapa que va a sufrir la deformación. Para crearla se ha seleccionado la opción de solido 3D deformable y se ha creado extruyendo un cuadrado de 205x205 mm una profundidad de 3 mm. La geometría final de la chapa ha quedado de la siguiente forma:

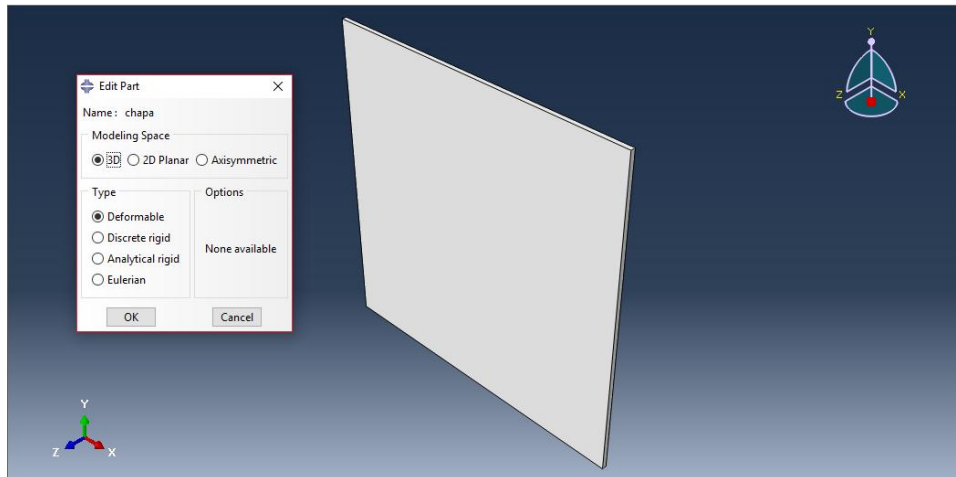


Ilustración 4.1 Geometría de la placa deformable en ABAQUS

La segunda geometría que hay que modelar es el punzón que va a realizar la deformación, para simplificar el problema esta geometría se ha definido como cuerpo rígido discreto (esto quiere decir que será mallado al igual que lo haríamos con un sólido deformable), ya que la deformación que sufre el punzón al ser el material del que está fabricado mucho más duro que el PVC, tanto el aluminio como el acero, despreciable.

La geometría del punzón se ha generado como una esfera de 10 mm de diámetro y hay que decir que se le ha asignado un punto de referencia a esta geometría para poder luego añadir la inercia, aunque este tema será tratado más detenidamente a continuación cuando se hable de la definición del material.

La geometría final del punzón ha quedado de la siguiente forma:

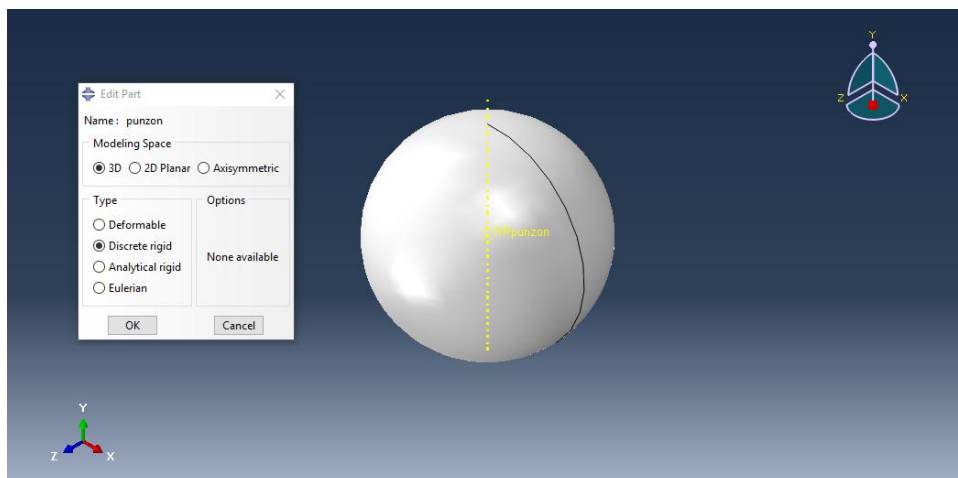


Ilustración 4.2 Geometría del punzón en ABAQUS

Por último, se ha generado una geometría que hará la función de soporte y que consiste en una chapa de 240x240x6 mm³ en la cual se realizará un agujero de 140 mm de diámetro.

Este cuerpo al igual que el punzón se ha modelado como sólido rígido discreto ya que tampoco sufrirá una deformación apreciable en comparación con las producidas en la chapa, ya que este soporte en los ensayos experimentales está fabricado de acero.

Al igual que cuando se creó el punzón, aquí también hemos asignado un punto de referencia en el cual se asignará la inercia.

Se puede ver como ha quedado el soporte en la siguiente imagen:

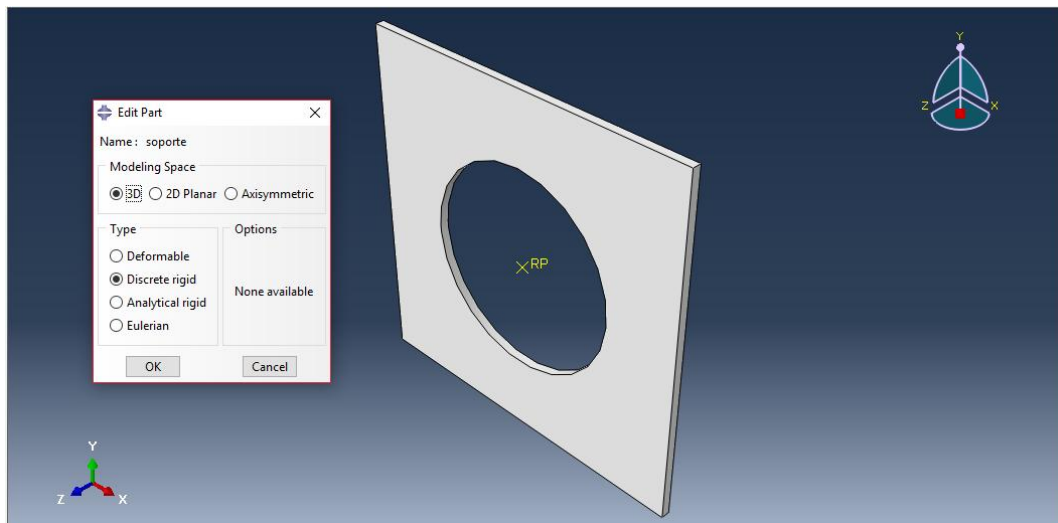


Ilustración 4.3 Geometría del soporte en ABAQUS

4.1.2. Material

En esta sección se hablará de cómo se ha definido en el software de elementos finitos tanto el material del que está como la definición de las inercias en los cuerpos definidos como rígidos.

Antes de comenzar a ver la asignación del material a cada una de las geometrías hay que definir el sistema de unidades que se va a utilizar en ABAQUS ya que se debe utilizar un sistema de unidades consistente. Este sistema de unidades será utilizado tanto como para introducir las variables del problema como

para las soluciones aportados por el programa. En la siguiente tabla podemos ver los diferentes sistemas de unidades consistentes con los que podemos trabajar en ABAQUS.

Cantidad	SI	SI (mm)	US Unid (ft)	US Unit (inch)
Longitud	m	mm	ft	in
Fuerza	N	N	lbf	lbf
Masa	kg	Ton (10^3kg)	slug	$\text{lbf s}^2/\text{in}$
Tiempo	s	s	s	s
Esfuerzo	$\text{Pa (N/m}^2\text{)}$	$\text{MPa (N/mm}^2\text{)}$	lbf/ft^2	$\text{psi (lbf/in}^2\text{)}$
Energía	J	$\text{mJ (}10^{-3}\text{J)}$	ft lbf	in lbf
Densidad	Kg/m^3	Ton/mm^3	slug/ft^3	$\text{lbf s}^2/\text{in}^4$

Tabla 4.1 Sistemas de unidades consistentes en ABAQUS

En nuestro caso se ha utilizado el sistema de unidades marcado en rojo en la tabla que es el sistema internacional de unidades basado en el milímetro.

Por lo tanto hay que tener en cuenta que, al introducir una masa esta debe ser expresada en toneladas, ya que anteriormente al definir las geometrías las medidas se han introducido en milímetros.

Una vez aclarado este aspecto se empezará con la caracterización de los cuerpos rígidos, como se ha comentado anteriormente se han creado puntos de referencia en estos para poder asignar un punto de inercia. Debido a que se utilizar un solver explícito el cual utiliza la variación de energía cinética para resolver el problema es necesario que todos los cuerpos tengan bien definida la masa. Debido a que los cuerpos rígidos no se les puede asignar un material al igual que en los deformables en los cual se define una densidad, hay que crear una propiedad de punto de inercia en el cual se definirá el peso de cada uno de los cuerpos. Los pesos seleccionados son aproximados y se ha decidido darle al punzón un peso de 100 g mientras que al soporte se le ha dado un peso de 2 kg.

Por ejemplo, el punto de inercia definido en el punzón ha quedado de la siguiente forma:

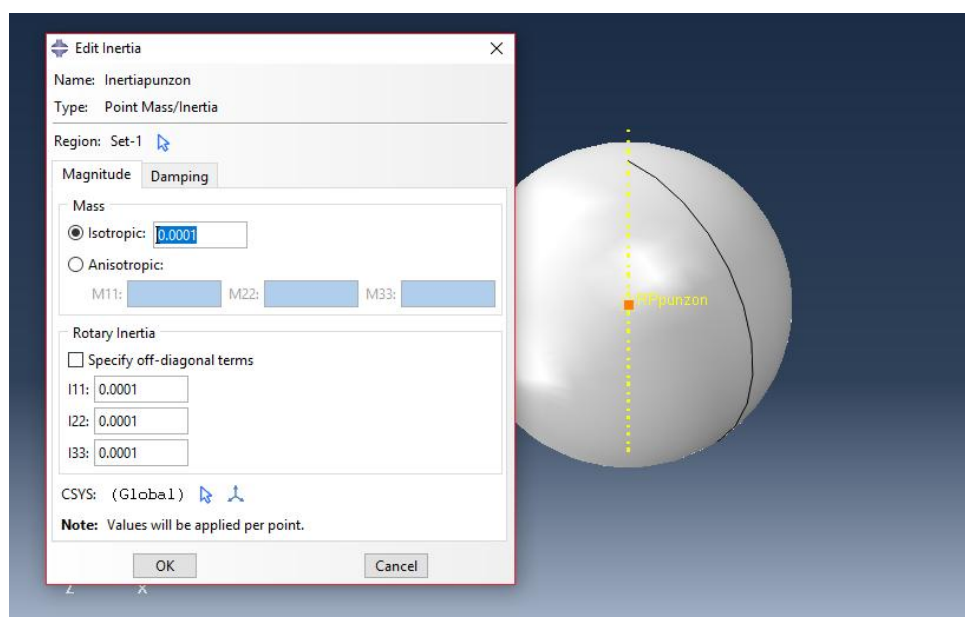


Ilustración 4.4 Configuración de la inercia del punzón

Por otro lado para la definición del material de la chapa que va a ser deformada, sí que se ha definido un material en el cual se tiene que modelar tres parámetros que son la densidad, el comportamiento elástico y el comportamiento plástico.

Tanto el comportamiento elástico como el plástico fue caracterizado mediante una serie de ensayos en un trabajo anterior de MARCOS JESUS en el cual se calcularon los coeficientes de la ecuación de Jonhson Cook que define el comportamiento plástico del PVC así como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson que definen el comportamiento elástico.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de todos los coeficientes necesarios para definir por completo el comportamiento del material utilizado, que en nuestro caso se trata de PVC.

A	B	N	C	Epsilon dot zero
33.9	35	0.41	0.059	0.0009

Tabla 4.2 Coeficientes de la ecuación de Jonhson Cook para el PVC

E (MPa)	ν	Densidad (kg/m ³)
2881.78	0.38	1420

Tabla 4.3 Tabla de propiedades elásticas y densidad del PVC

La definición del material en el programa quedaría de la siguiente forma:

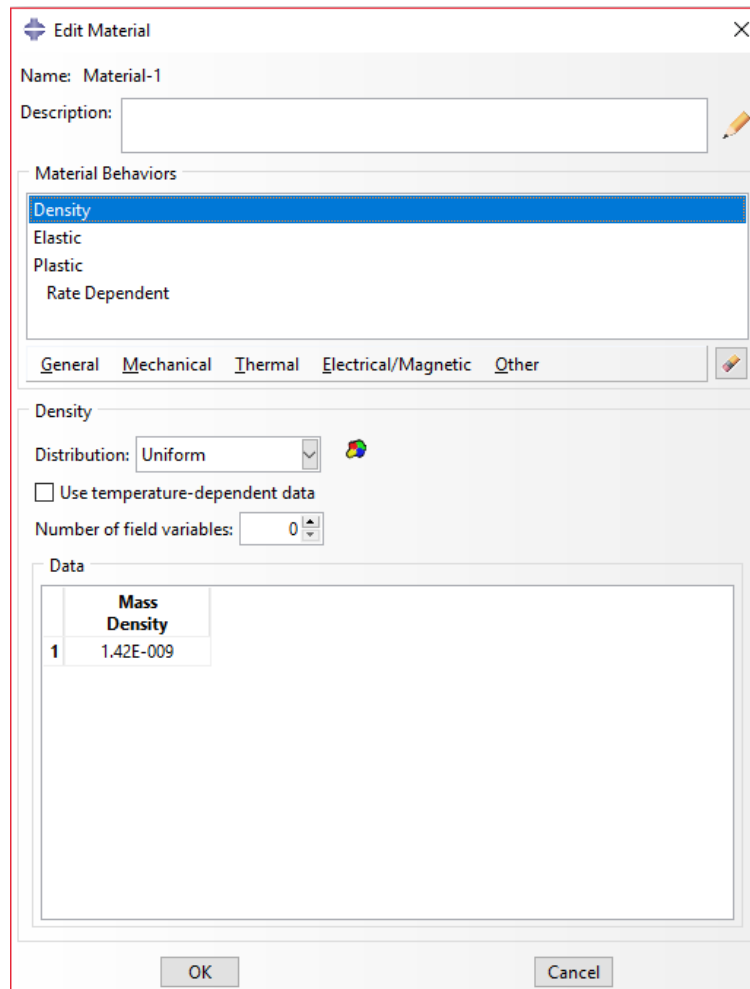


Ilustración 4.5 Configuración del material en ABAQUS

4.1.3. Ensamblaje

En este apartado simplemente se ha creado un instance donde se han introducido las tres geometrías que son la chapa, el punzón y el soporte y se ha definido la posición que debe ocupar cada uno de ellos. El ensamblaje ha quedado de la siguiente forma:

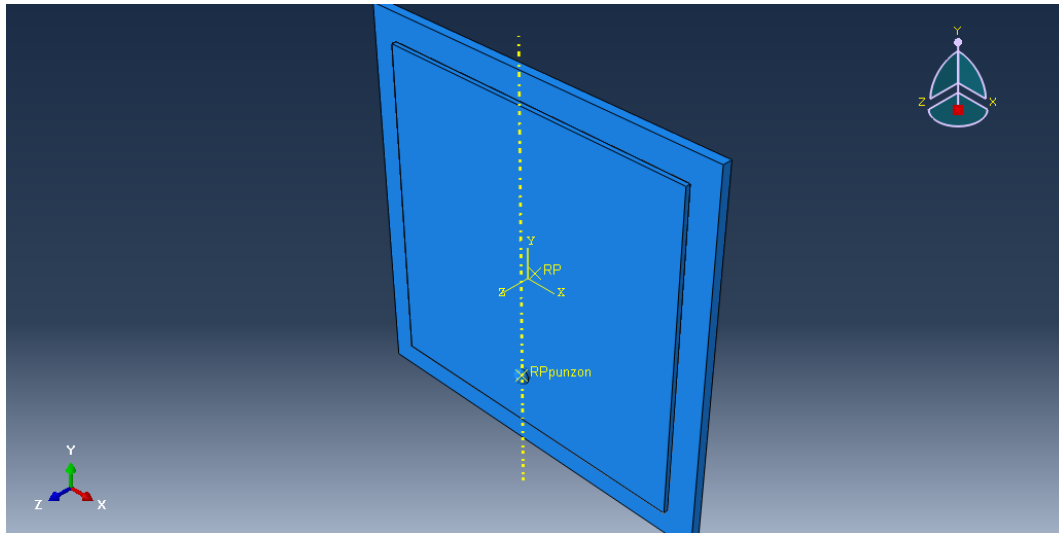


Ilustración 4.6 Ensamblaje de las diferentes geometrías creadas en ABAQUS

4.1.4. Creación del step

En este apartado se tratará la elección del step para resolver el problema. El problema se puede resolver tanto con un solver explícito como implícito, pero debido a que en la bibliografía consultada el método más común para resolver problemas de deformación incremental es el explícito se ha optado por seleccionar este método.

El inconveniente del método explícito es que para que la simulación sea estable los incrementos de tiempo están muy limitados, aunque también hay que decir que para calcular cada uno de estos incrementos el coste computacional es mucho menor que en los métodos implícitos, ya que no se debe resolver un sistema de ecuaciones.

Debido al inconveniente de los pequeños incrementos de tiempo, si la simulación se modela a velocidad real, dado que el proceso completo de deformación con una velocidad de avance de 1500 mm/min dura aproximadamente unos 1253 s, la resolución completa del problema mediante el método explícito se alargaría demasiado. Por lo tanto se ha optado por aplicar un time scaling, que consiste en aumentar la velocidad en el modelo de la simulación multiplicando por un factor la velocidad real que se ha configurado en los experimentos reales.

Utilizando un time scaling mayor se reduce mucho el tiempo requerido para resolver la simulación pero en teoría los resultados obtenidos serán menos fiables.

Debido a que el problema es cuasiestático, la velocidad del punzón se supone constante durante todo el proceso, por lo tanto la aceleración es nula. Siguiendo este razonamiento se puede llegar a la conclusión de que al aumentar el módulo de esta velocidad no debería de influir en las fuerzas provocadas por el punzón para deformar la chapa.

Aún así, los resultados pueden cambiar, por lo que se ha optado a realizar varias simulaciones con diferentes factores de time scaling para poder comparar los resultados obtenidos.

Un factor de time scaling mayor se reduce mucho el tiempo que tarda el ordenador en resolver la simulación pero en teoría los resultados obtenidos son de peor calidad.

4.1.5. Trayectoria de la herramienta

Para realizar el modelo del problema debemos introducir en el software la trayectoria que debe seguir el punzón. Para ello se determinará su posición en los tres ejes cartesianos en función del tiempo. Para ello se ha programado una función en MatLab que a partir de unas variables de entrada, calcula la nube de puntos que debe seguir el punzón a lo largo del tiempo guardando estos datos en una matriz de 4 columnas, en la cual las tres primeras corresponden a la posición x, y, z mientras que en la última queda almacenado el instante de tiempo.

Las variables de entrada para definir la trayectoria son las siguientes:

- Pendiente del tronco de cono.
- Diámetro superior del tronco de cono.
- Altura del tronco de cono.
- Paso incremental en Z de la herramienta.
- Velocidad de avance de la herramienta en mm/min.
- Número de puntos de cada una de las circunferencias generadas.

Como respuesta el programa calcula la matriz de la que hemos hablado anteriormente. Se han introducido las variables geométricas para obtener el tronco

de cono, con una velocidad de 1500 mm/min, un paso de 0.5 mm y un número de puntos en los que se divide cada circunferencia de 100. Si se representa la nube de puntos obtenida, quedaría de la siguiente forma:

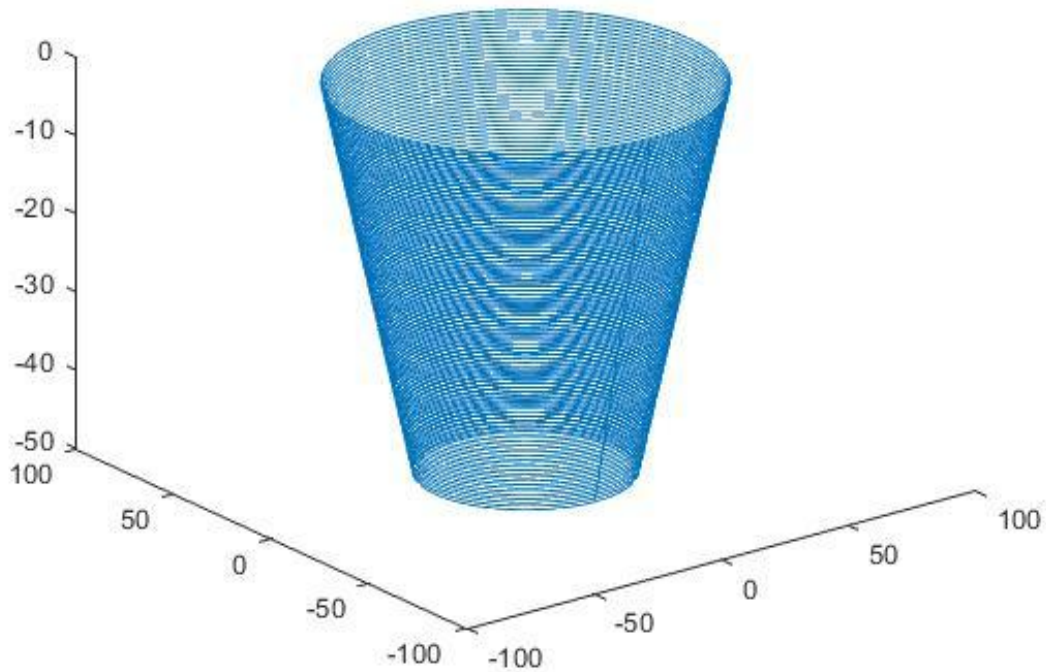


Ilustración 4.7 Nube de puntos de la trayectoria seguida por el punzón

Estos puntos serán ligados a la condición de contorno del punzón, haciendo que este se mueva a lo largo del tiempo. La metodología que se ha seguido para la configuración de estas condiciones de contorno será explicada detenidamente en el siguiente capítulo. El código completo de MatLab está incluido en el anexo con nombre **gen_trayectoria.m**.

4.1.6. Condiciones de contorno

Para crear el modelo de nuestro problema se han definido diferentes condiciones de contorno las cuales se ha intentado que sean lo más próximas posible a las características del ensayo real.

Para el soporte se han utilizado empotramientos que impiden el movimiento y el giro en todos los ejes y se han definido en toda la superficie de la geometría del soporte.

Para la chapa se ha optado por empotrar las superficies laterales de la siguiente forma:

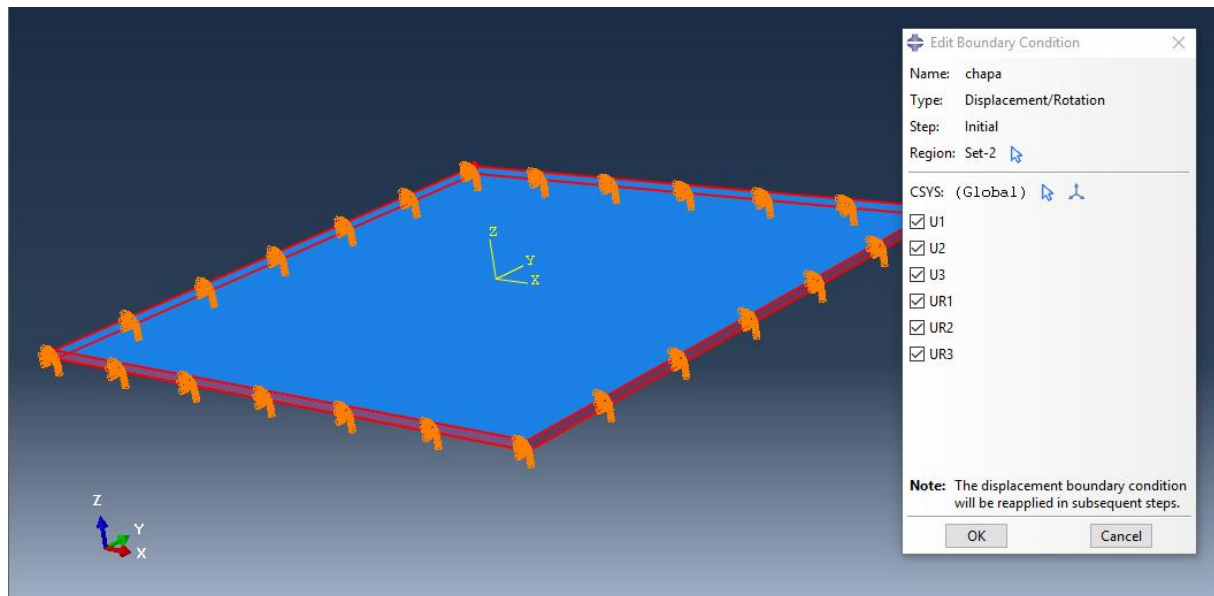


Ilustración 4.8 Condiciones de contorno de la placa deformable en ABAQUS

Por último nos queda definir las condiciones de contorno del punzón. En primer lugar se ha optado por impedir el giro del punzón durante el proceso. Para ello se ha modelado un empotramiento a lo largo de toda la superficie del punzón.

Por otro lado, se debe introducir el movimiento que debe seguir el punzón para realizar la deformación incremental en la chapa. Para ello hay que definir una condición de contorno para cada uno de los ejes cartesianos en el punto de referencia del punzón. Una vez creados se deben introducir los valores de posición a lo largo del tiempo creando Amplitudes y seleccionando dentro de este módulo la opción de smooth step. Esta opción hace que el salto de un punto a otro no sea de manera instantánea, si no que el software calcula una transición suave entre puntos.

Una vez introducidos los valores de posición de cada eje a lo largo del tiempo debemos modificar las condiciones de contorno de cada eje. Para ello, se dará un valor de una unidad, que será multiplicada por el valor de la amplitud en los

diferentes saltos de tiempo. Por ejemplo, la modificación de la condición de contorno en el eje X quedaría de la siguiente forma:

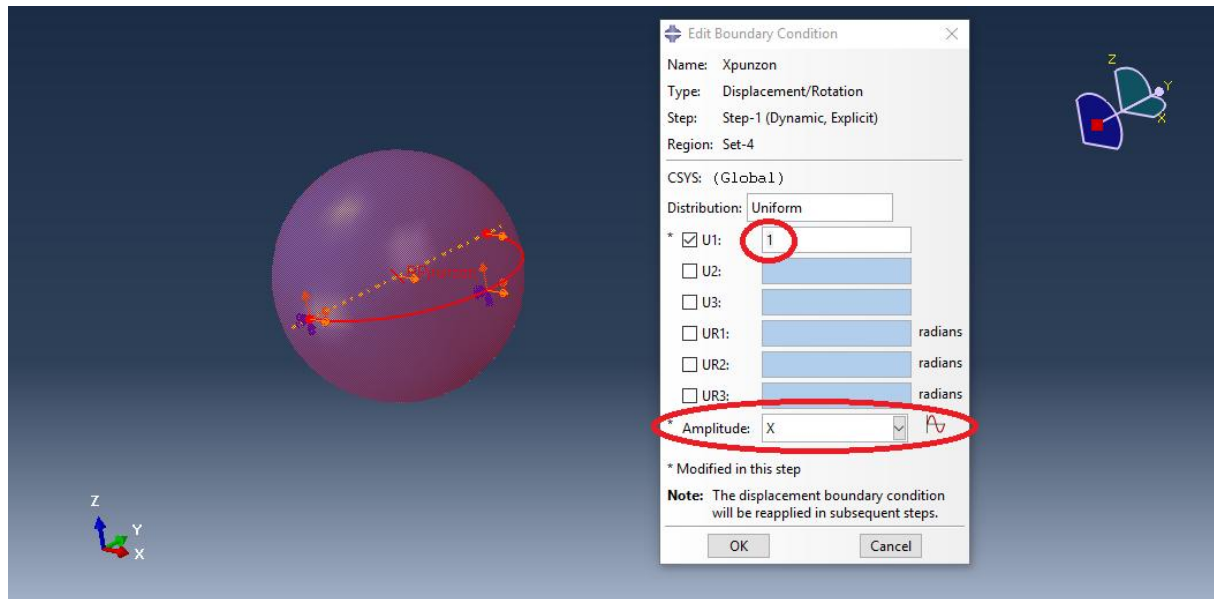


Ilustración 4.9 Condiciones de contorno del punzón en ABAQUS

Realizando este procedimiento para cada uno de los ejes queda totalmente definido el movimiento del punzón a lo largo del tiempo.

4.1.7. Definición de interacciones

Para que la deformación de la chapa sea posible es necesario definir las propiedades de contacto entre las diferentes geometrías del modelo.

Para ello se ha creado una propiedad de contacto en la que se ha tenido en cuenta tanto el comportamiento normal como el comportamiento tangencial. Para el normal se ha definido un modelo de hard contact, mientras que para el comportamiento tangencial se ha definido un modelo penalty con un coeficiente de fricción de 0.01, que es el que normalmente se utiliza para simulaciones de problemas de deformación incremental.

En la siguiente imagen podemos ver como ha quedado configurada la ventana de propiedad de contacto:

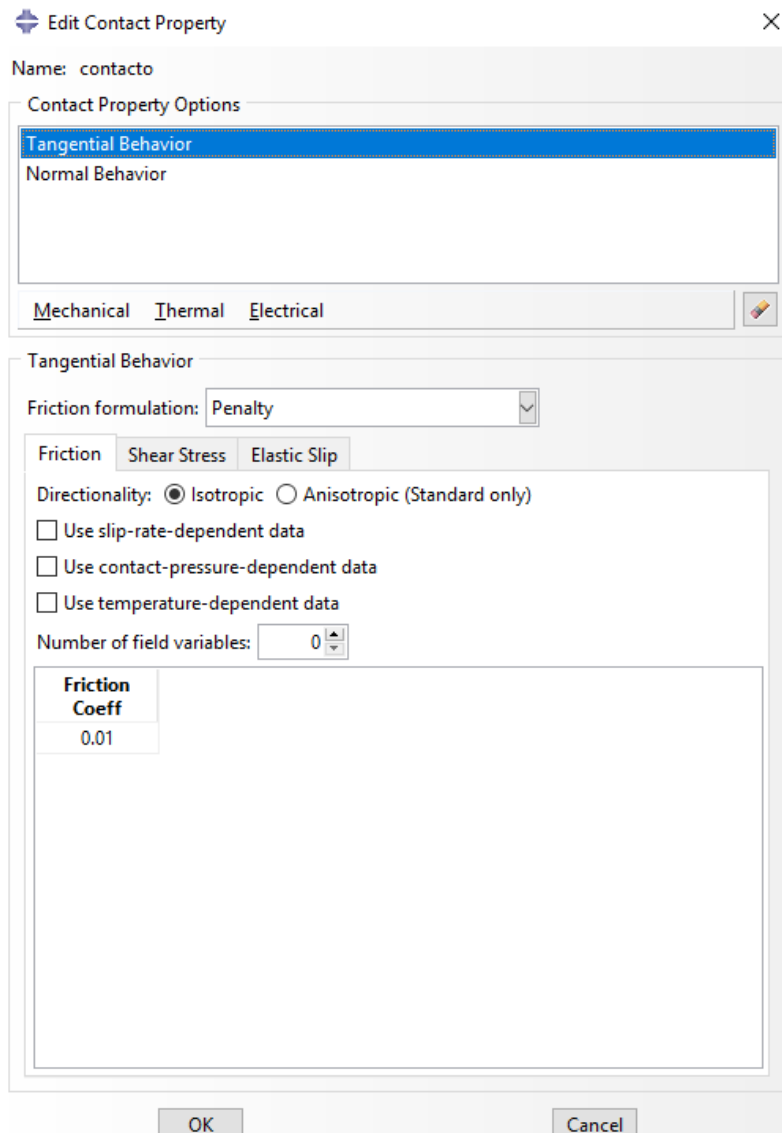


Ilustración 4.10 Configuración de la interacción entre superficies

Por último se ha definido esta propiedad entre las diferentes superficies que quedaran en contacto. Por lo que se ha creado una interacción entre toda la superficie del punzón y la superficie superior de la chapa y otra para la superficie inferior de la chapa y la superficie superior del soporte.

De esta manera queda definido el contacto entre las diferentes superficies de nuestro problema.

4.1.8. Definición de la malla

En este apartado se tratará la definición de la malla de las diferentes geometrías del problema, así como los diferentes tipos de elemento utilizados en cada una de ellas.

En primer lugar se definirá la malla del punzón y del soporte que fueron definidos como cuerpos rígidos por lo que el tipo de elemento utilizado para estas dos geometrías es el mismo. Para ello se ha utilizado un elemento R3D4 (A 4-node 3-D bilinear rigid quadrilateral) que es el elemento que ABAQUS asigna por defecto a todos los cuerpos rígidos, aunque es necesaria activar la casilla de tipo de elemento explícito, ya que en nuestra simulación se utilizara un solver explícito.

Para el punzón se ha seleccionado un tamaño de elemento de 1.1 mm y para el control de generación de la malla se ha seleccionado la opción de sweep. Finalmente la malla en el punzón ha quedado de la siguiente forma:

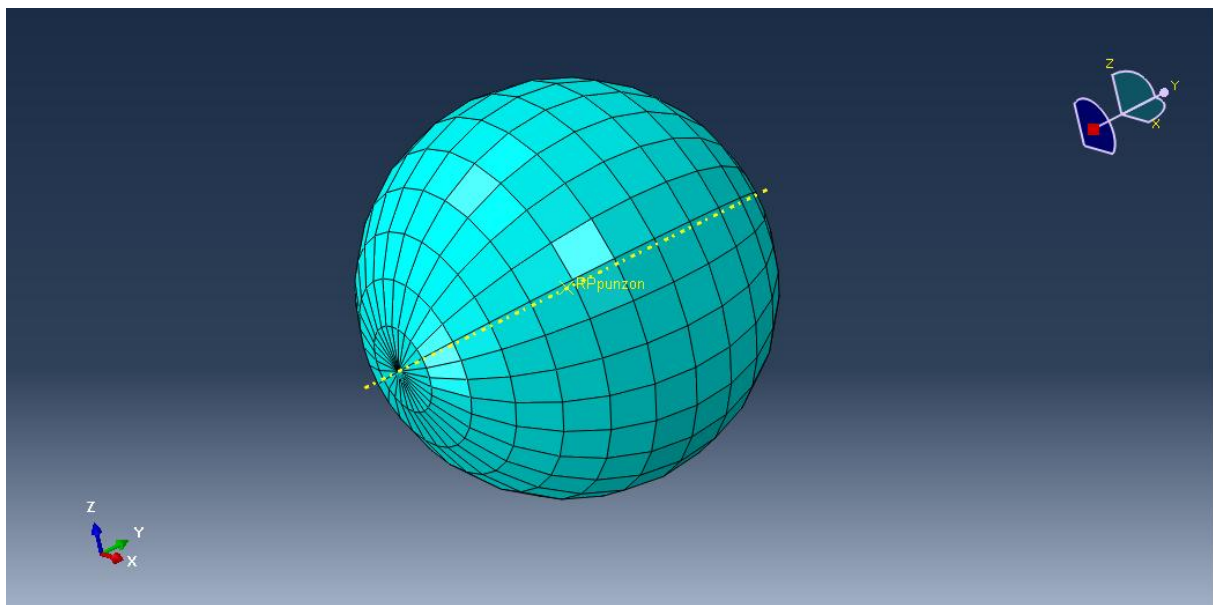


Ilustración 4.11 Mallado del punzón en ABAQUS

Para el soporte se ha seleccionado un tamaño de elemento de 12 mm obteniendo una malla que queda reflejada en la siguiente imagen:

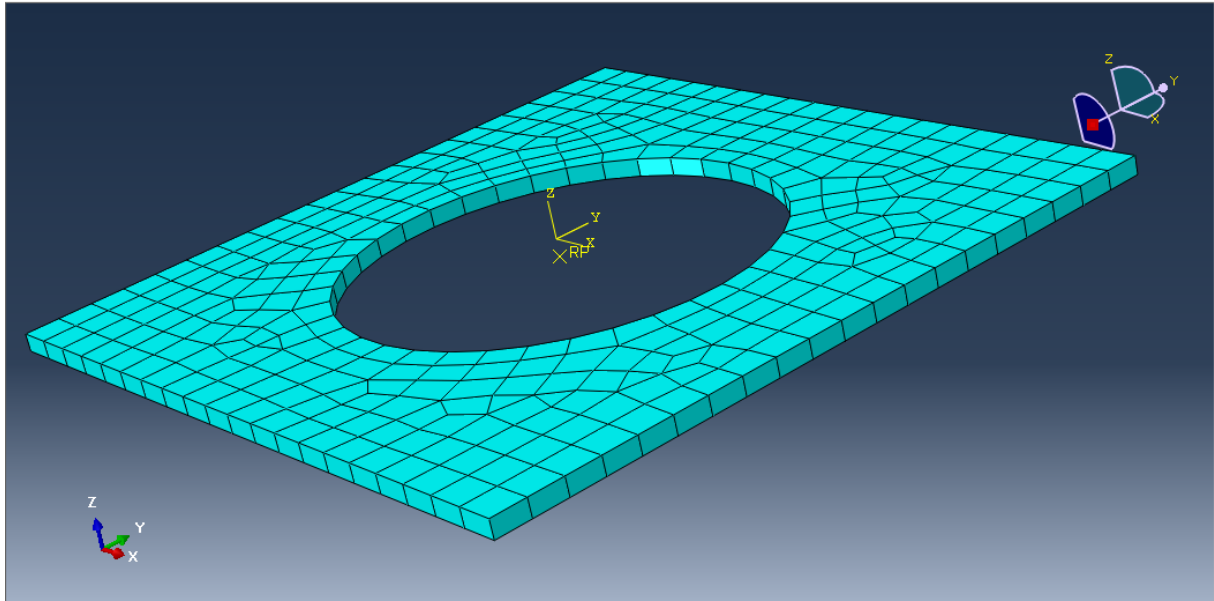


Ilustración 4.12 Mallado del soporte en ABAQUS

Por otro lado es necesario definir la malla utilizada en la chapa que va a ser deformada. Debido a que esta geometría ha sido definida como sólido deformable disponemos de una amplia gama de tipos de elementos que pueden ser definidos.

Se ha optado por utilizar un elemento C3D8I (An 8-node linear brick, incompatible modes) al ser un elemento de modos incompatibles se incrementan las funciones de forma obteniendo un mejor resultado en problemas de flexión y reduciendo la aparición de bloqueo por cortante. Debido a estas características se ha decidido utilizar este tipo de elemento, además de haber sido utilizado en trabajos anteriores obteniéndose resultados aceptables con su utilización.

Al igual que en el caso de los cuerpos rígidos debemos marcar la casilla de tipo de elemento explícito y se ha optado por un orden de precisión de segundo orden para que la solución obtenida sea más precisa aunque aumente un poco el tiempo de cálculo.

Además se observó en simulaciones de modelos anteriores que aparecía un problema de distorsión de elementos que provocaba la parada de la simulación a los pocos incrementos en z del punzón. Para resolver este problema se debe de seleccionar la casilla de control de distorsión y marcar la casilla de yes y aplicar un ratio de longitud de 0.1. Al configurar los elementos de esta manera en la chapa desaparecía el problema de distorsión de los elementos y la simulación se completa sin error alguno.

La configuración del tipo de elemento utilizado en la chapa quedaría de la siguiente forma:

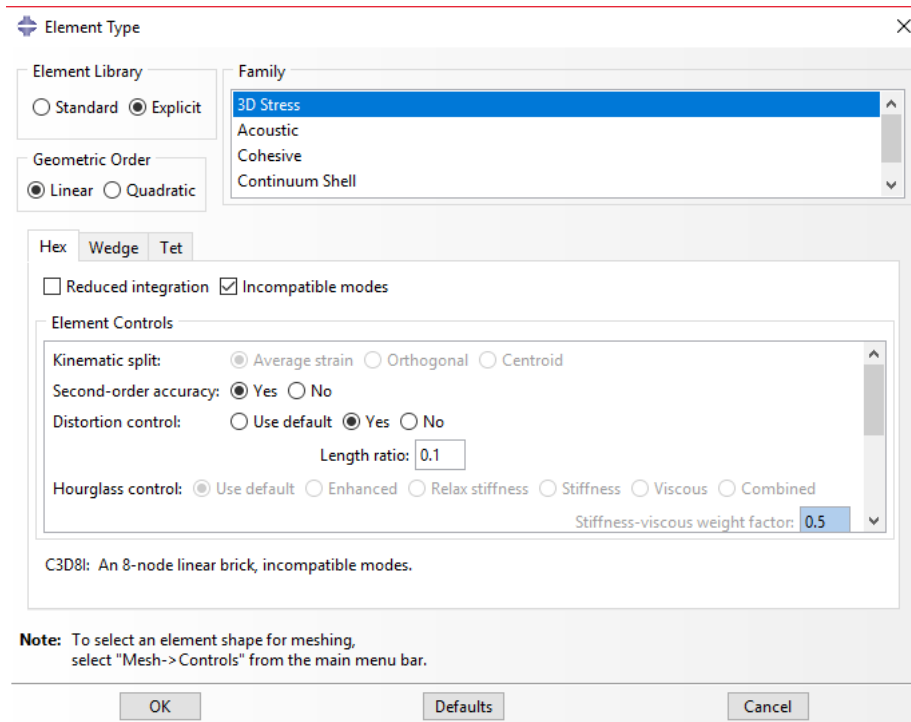


Ilustración 4.13 Configuración del tipo de elemento en la placa deformable

El tamaño de elemento seleccionado ha sido de 5 mm, que es un tamaño con el cual se pueden obtener buenos resultados numéricos sin incrementar demasiado el tiempo de cálculo requerido. Se ha obtenido la malla que puede observarse en la siguiente imagen:

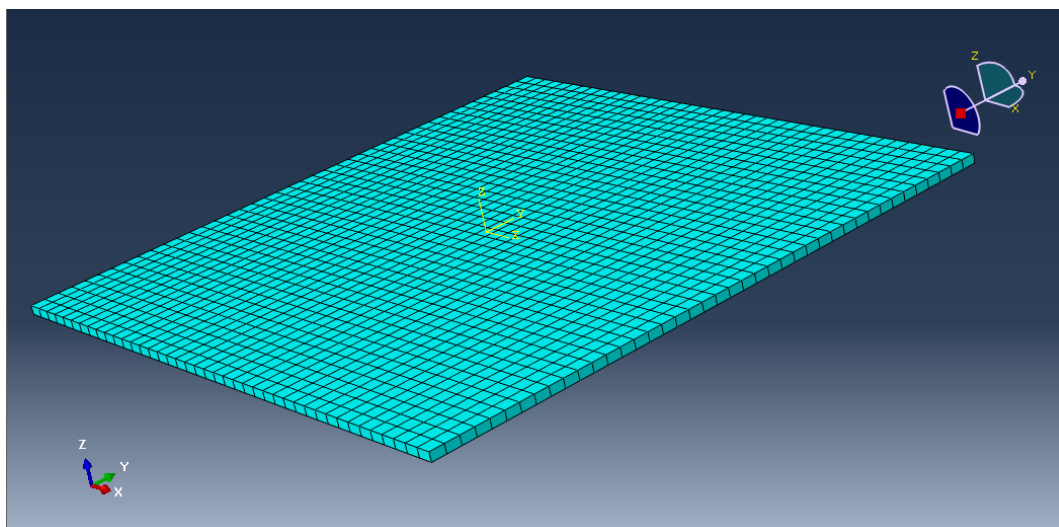


Ilustración 4.14 Mallado de la placa deformable en ABAQUS

4.1.9. Creación del JOB

Para poder obtener un resultado para cada uno de los diferentes factores de time scaling es necesario crear un Job independiente para cada uno de ellos.

Los diferentes Jobs, creados con su correspondiente factor de time scaling y la velocidad de avance de simulación programada en cada uno de ellos, quedan representados en la siguiente tabla:

JOB	TIME SCALING	FEED SIM (mm/min)
13_1_1	10000	15000000
27_12_2	1000	1500000
28_12_1	100	150000

Tabla 4.4 Tabla de simulaciones con diferente time scaling a realizar

Todos estos Jobs se han configurado de la misma forma, se ha utilizado el 95% de la memoria de la CPU, se han utilizado dos procesadores de forma paralela y se ha marcado la opción de precisión completa. Los resultados obtenidos en cada uno de los Jobs serán analizados más adelante.

4.2. Análisis de Springback mediante FEM

Una vez creado el modelo que simula el proceso de deformación, es interesante simular el proceso de recuperación elástica que sufre la chapa al eliminar las sujeciones que la mantienen fija a la mesa de la fresadora.

Para realizar este proceso en Abaqus, se debe crear un modelo nuevo en el cual se introduzca como condición inicial el último estado del modelo en el que se produce la deformación. Lo ideal para este tipo de análisis es usar un solver implícito, pero como en nuestro caso se han utilizado elementos de modos incompatibles, el software no permite exportar este tipo de elementos desde su modulo de solver explícito al implícito. Por lo tanto se ha optado por realizar la simulación con un solver explícito.

Para crear este modelo el primer paso es crear una copia del modelo en el cual se realiza la deformación. En esta copia se deben borrar todas las instances introducidas, excepto la chapa, además de todas las condiciones de contacto y steps.

Se debe crear un step nuevo, con un tiempo pequeño, por ejemplo de 0.1 segundos. Además, se deben tener los efectos producidos por la no linealidad marcando la casilla correspondiente en la ventana de creación de step.

El siguiente paso es definir el estado inicial del modelo de springback como el estado final de la simulación donde se produce la deformación. Para ello se crea un Predefined Field de la siguiente forma, marcando el job del cual se quiere extraer el estado final y la geometría a la cual va a ser asignado este estado, la ventana de configuración quedaría de la siguiente forma:

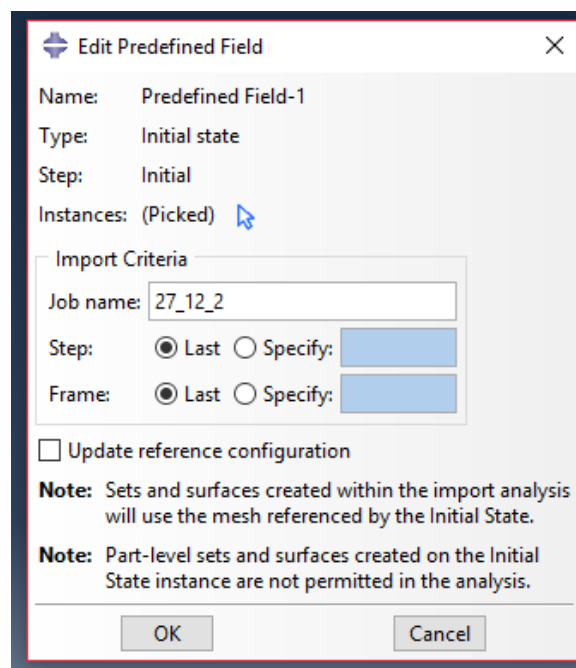


Ilustración 4.15 Configuración del Predefined Field

Una vez definido el estado inicial es necesario redefinir las condiciones de contorno. Hay que decir que se han eliminado todas las condiciones del modelo anterior, por lo que la chapa quedaría libre. Para poder ver el resultado de la recuperación elástica que se produce en la chapa es necesario definir alguna condición de contorno, se ha optado por fijar algunos de los nodos que se encuentra

en la base del tronco y que no sufren deformación. La condición de contorno definida quedaría de la siguiente forma:

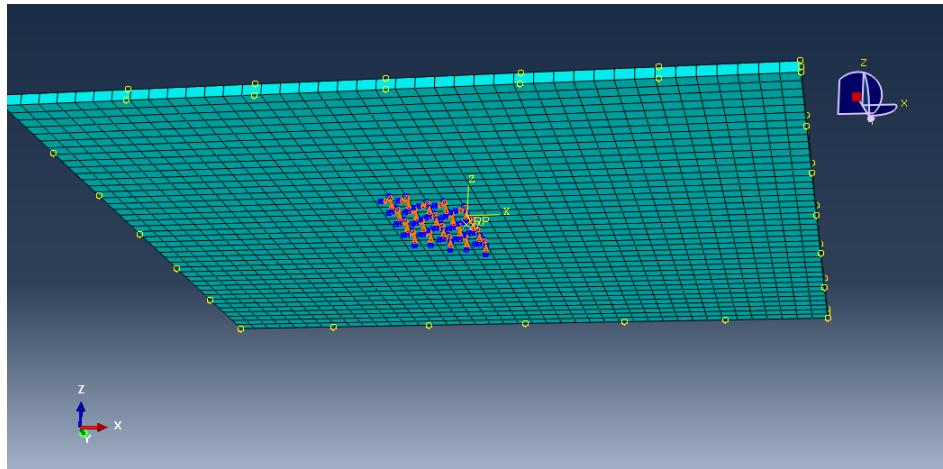


Ilustración 4.16 Condiciones de contorno en la placa deformable para el SPRINGBACK

Por último, se define un nuevo job, para lanzar la simulación en la cual se calculará el efecto de la recuperación elástica del problema.

4.3. Resultados obtenidos de la simulación

En este capítulo tratarán las diferentes variables que se han post-procesado una vez resueltas todas las simulaciones lanzadas.

4.3.1. Geometría final obtenida

A continuación se mostrarán las formas obtenidas después de la simulación para cada uno de los time scaling de 100, 1000 y 10000.

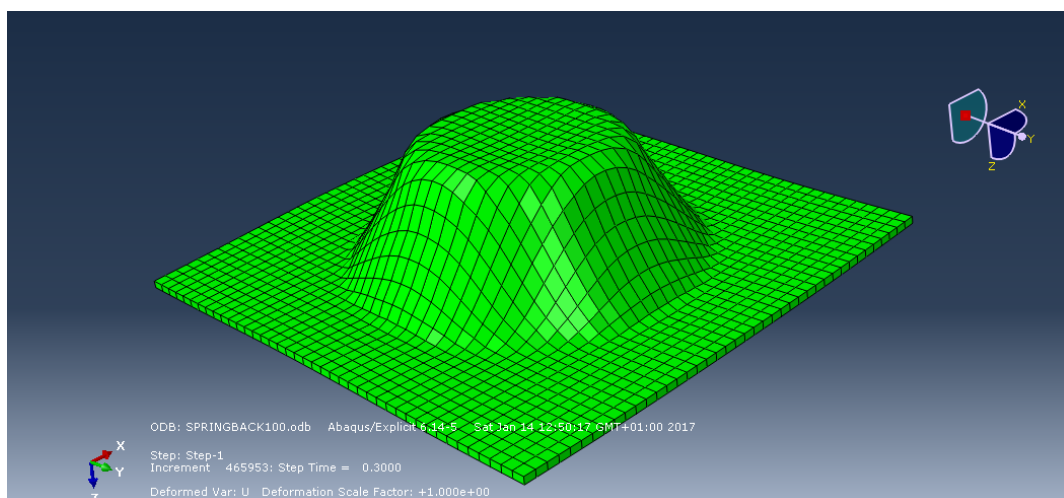
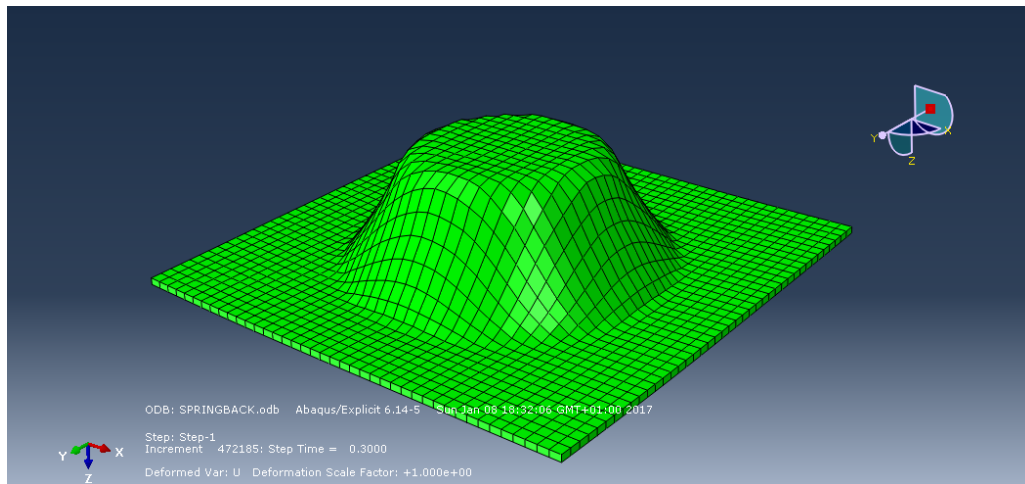
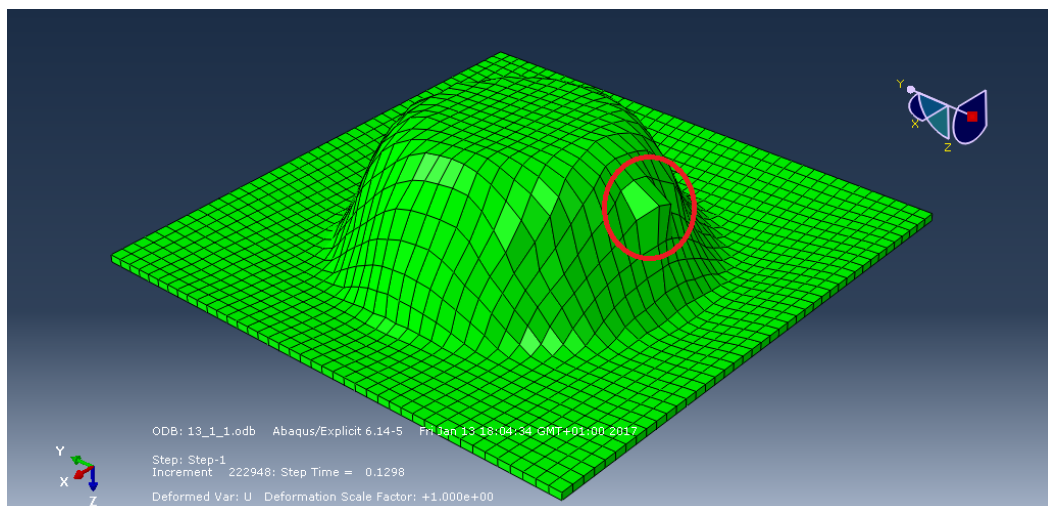


Ilustración 4.17 Geometría obtenida con time scaling 100

**Ilustración 4.18 Geometría obtenida con time scaling 1000****Ilustración 4.19 Geometría obtenida con time scaling 10000**

Para las dos primeras chapas obtenidas, que corresponden a time scaling de 100 y 1000, se obtiene una geometría a simple vista muy parecida a la obtenida experimentalmente pero en cambio, para un time scaling de 10000, se obtiene un defecto que se ha marcado en rojo en la imagen. Debido a este defecto se ha decidido no tener en cuenta los resultados de la simulación ya que el resultado geométrico obtenido no es aceptable.

Por otro lado, para poder visualizar si se produce torsión en la simulación se visualizará la chapa desde arriba para ver si la base inferior del tronco de cono ha sufrido un giro con respecto a la parte superior de la chapa.

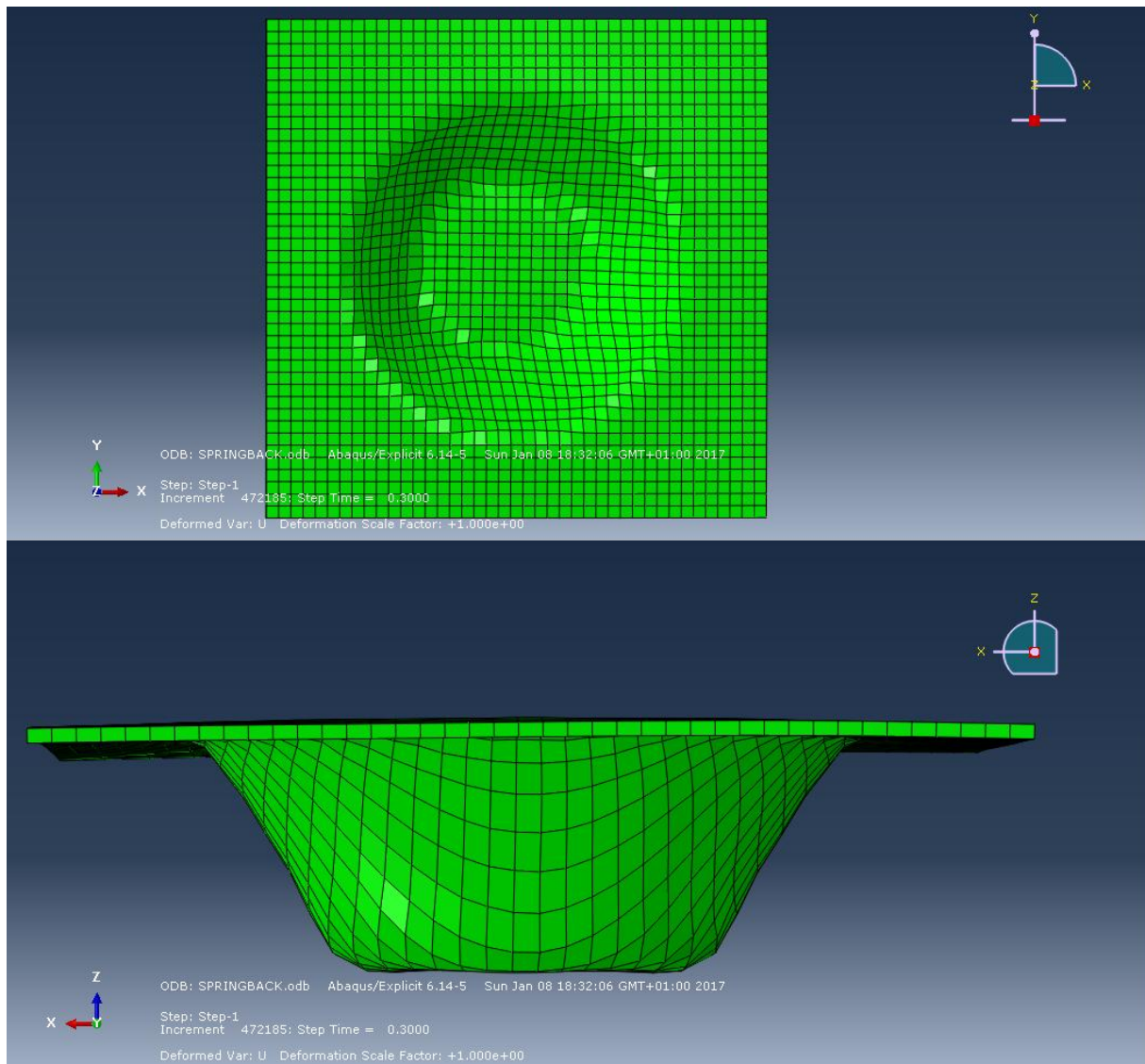


Ilustración 4.20 Efecto de la torsión en el modelo simulado

Se ha mostrado únicamente la chapa de time scaling 100 debido a que los efectos de la torsión son muy pequeños, ya que apenas se produce giro en el tronco de cono, ya que las líneas de la malla permanecen casi en la misma dirección que antes de la deformación.

4.3.2. Perfil

Para poder graficar se ha realizado un proceso semejante al realizado experimentalmente, se ha medido la altura Z de una serie de puntos a lo largo de un eje en X. Para ello se ha seleccionado una línea de la malla que corta transversalmente la chapa deformada por la mitad, se ha seleccionado un nodo de esta línea como origen de coordenadas y se ha medido el modulo de la distancia tanto en el eje X como en el eje Z entre los nodos a lo largo de la línea y el nodo de

referencia que se ha escogido. Este proceso se ha repetido para los resultados obtenidos con time scaling 100 y 1000 y se han introducido los valores medidos en un archivo Excel, y cambiando el origen de coordenadas por un punto de la base inferior del tronco de cono se ha graficado la geometría del perfil. También se ha dibujado sobre la misma gráfica la geometría teórica para poder comparar.

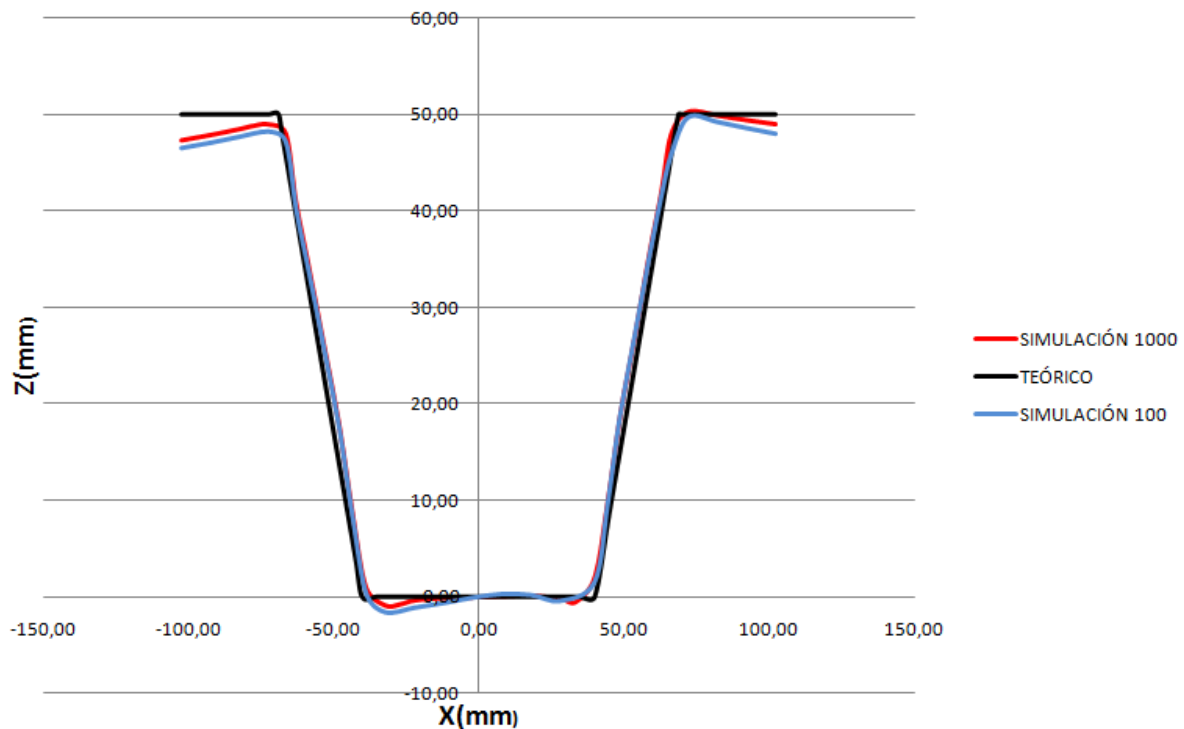


Ilustración 4.21 Gráfica del perfil obtenido mediante diferentes time scaling

Se puede observar que el resultado de ambas simulaciones se asemeja con bastante precisión a la geometría teórica que se quería obtener a lo largo de casi todo el eje X. Sin embargo, como se ha configurado el modelo de la simulación de manera que se ha simulado la recuperación elástica que sufre la chapa una vez que se libera de las sujeciones, si se observa detalladamente se puede observar como el perfil obtenido mediante la simulación esta ligeramente menos deformado y no llega exactamente a la geometría teórica. De la misma manera, debido a la recuperación elástica en la parte superior de la chapa, que es donde se produce la sujeción, la geometría del perfil no coincide.

Debido a la diferencia mínima que obtenemos en la geometría del perfil al usar un factor de tiempo de 1000, es justificable usar este factor de tiempo ya que el tiempo de computación es mucho menor que usando un factor de tiempo de 100.

4.3.3. Espesor

Para medir el espesor de la chapa deformada obtenida mediante la simulación, se ha seguido un procedimiento parecido al utilizado para medir la geometría del perfil, solo que se ha medido la distancia entre las parejas de nodos de la parte superior e inferior de la chapa.

La nube de puntos obtenida se ha introducido en un archivo Excel para poder realizar el procesado de los datos y se ha dibujado la siguiente gráfica:

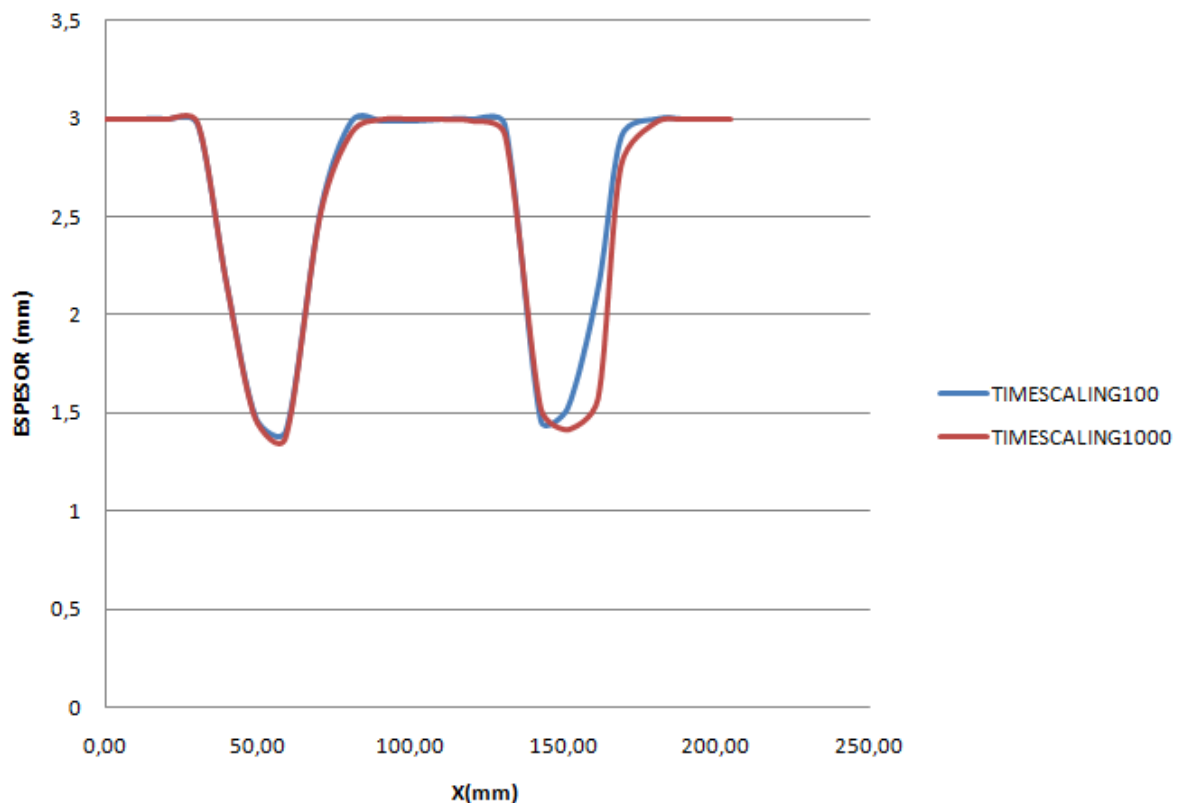


Ilustración 4.22 Gráfica del espesor a lo largo de una línea que pasa por el centro de la placa

Se puede ver como el espesor empieza a disminuir en la parte inclinada del tronco de cono, alcanzando justo en la mitad de este su valor mínimo, de 1.5 mm aproximadamente, para luego volver a aumentar a partir de este punto medio hasta alcanzar la base inferior del tronco de cono y llegar al valor inicial de 3 mm.

Respecto a las diferencias entre los resultados de espesor de la simulación con time scaling 100 y 1000, en la primera pendiente del tronco de cono la gráfica coincide con bastante exactitud mientras que en la segunda sí que hay diferencia, pero el valor máximo sigue siendo el mismo para ambos factores de tiempo, y

debido al tiempo de computación que ahorramos usando un factor de tiempo mayor, las diferencias entre los resultados se encuentran en rangos aceptables.

4.3.4. Fuerzas

Para poder representar la fuerza que ejerce el punzón en cada instante de tiempo, se han seleccionado todas las fuerzas de contacto entre el punzón y la chapa que aparecen en los puntos nodales de la malla del punzón y se han sumado todas ellas.

A continuación, se han graficado para un factor de time scaling de 100 la fuerza ejercida por el punzón en los diferentes ejes X, Y, Z.

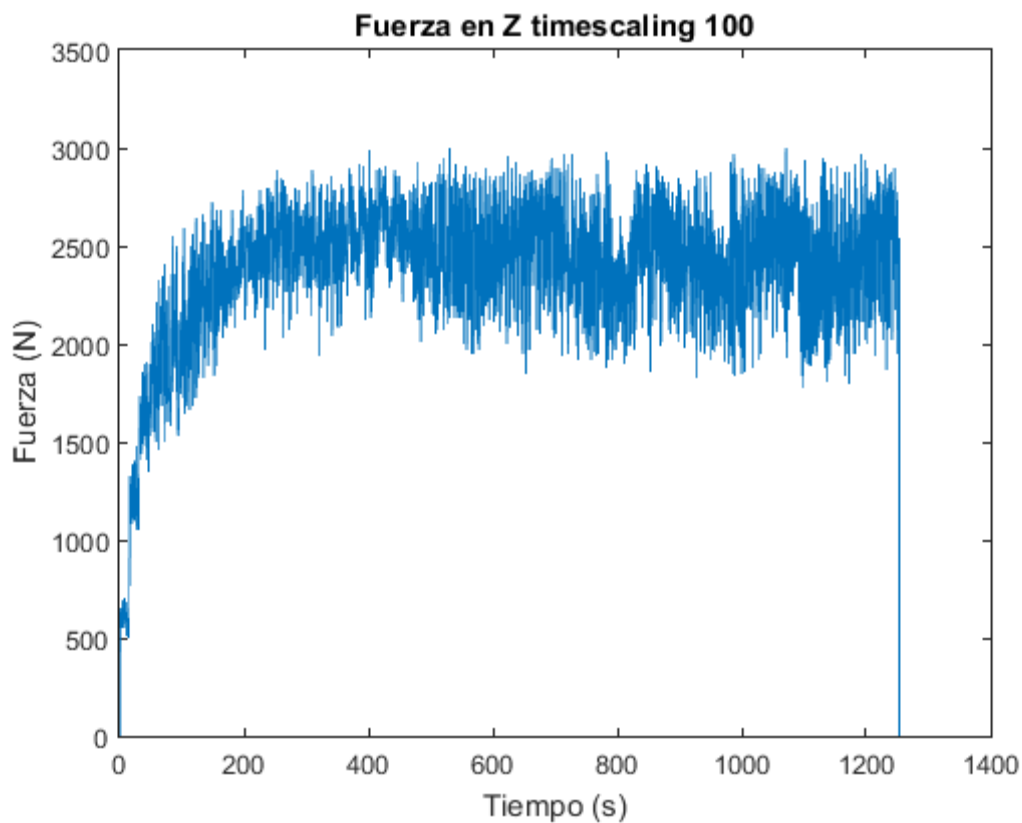


Ilustración 4.23 Fuerza en Z frente al tiempo obtenida con time scaling 100

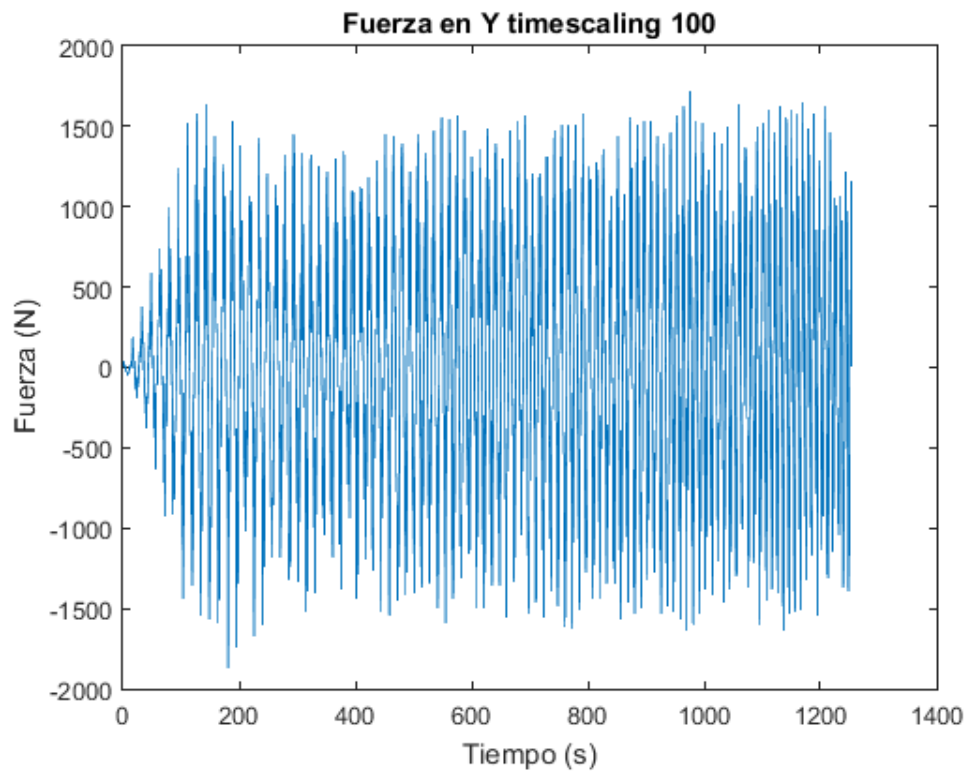


Ilustración 4.24 Fuerza en Y frente al tiempo obtenida con time scaling 100

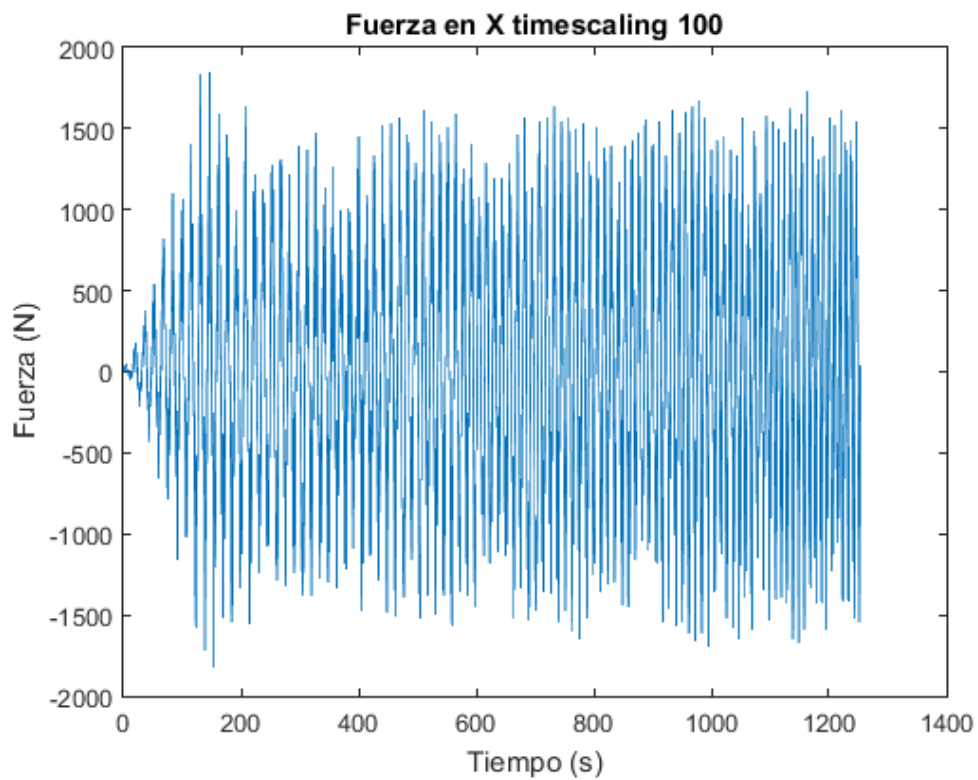


Ilustración 4.25 Fuerza en Z frente al tiempo obtenida con time scaling 100

Para poder observar la influencia del time scaling se han comparado los resultados de fuerza obtenidos en el eje Z, ya que esta es la más significativa del ensayo debido al carácter periódico de las fuerzas en los ejes X e Y. Se han seleccionado los dos valores de factor de time scaling extremos, los cuales son 100 y 1000, para poder ver la influencia de este factor.

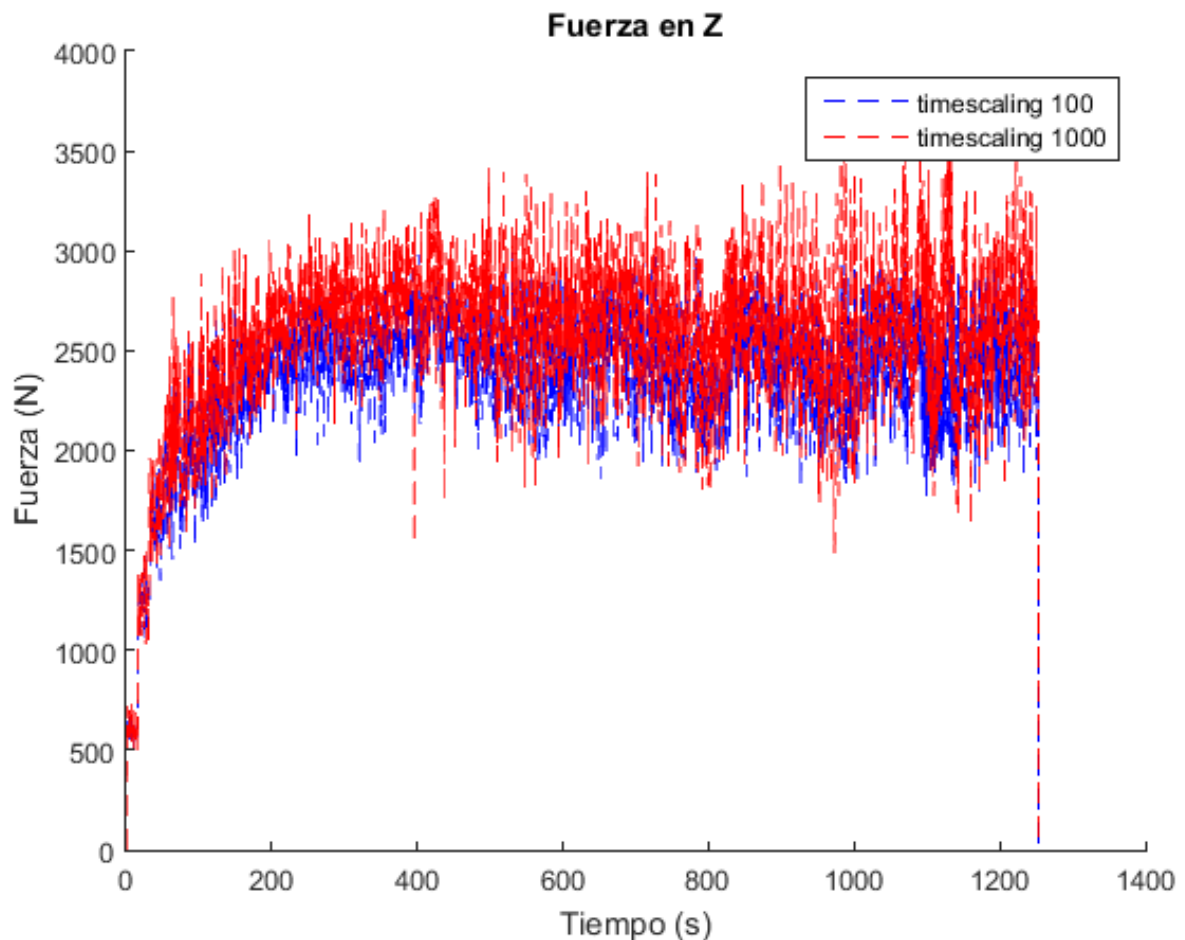


Ilustración 4.26 Comparación de fuerza en Z usando diferentes time scaling

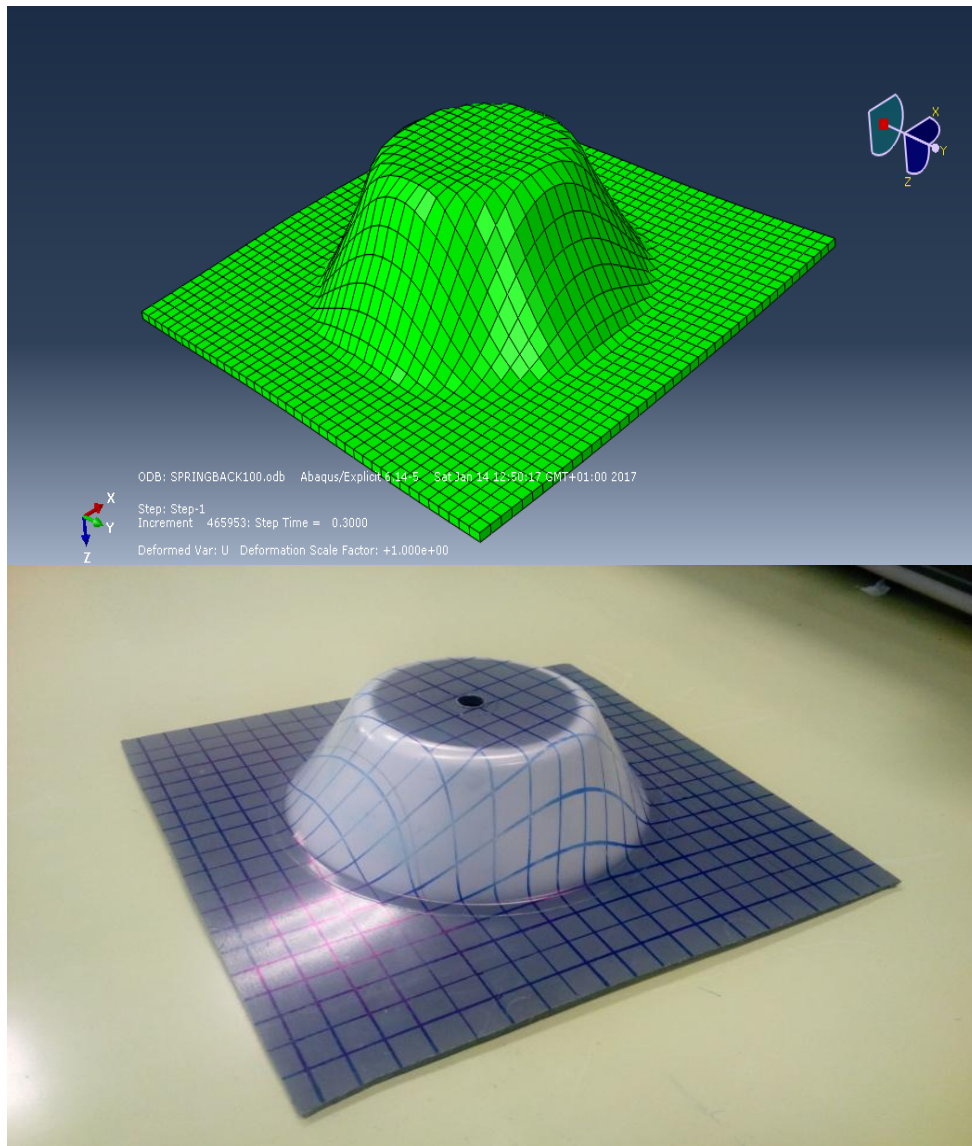
Se puede observar en la gráfica un ligero aumento de la fuerza ejercida por el punzón en el caso de time scaling 1000 pero, a grandes rasgos, los resultados obtenidos son bastante similares y debido al gran tiempo de calculo que ahorra el incremento de este factor estos resultados son bastante aceptables.

5. COMPARACIÓN RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULACION

En este capítulo se van a comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos mediante la simulación con ABAQUS. Concretamente, se ha realizado la comparación del ensayo número dos, que corresponde al punzón de aluminio y con velocidad de giro nula, con el resultado de la simulación con un factor de tiempo de 100.

5.1. Geometría obtenida

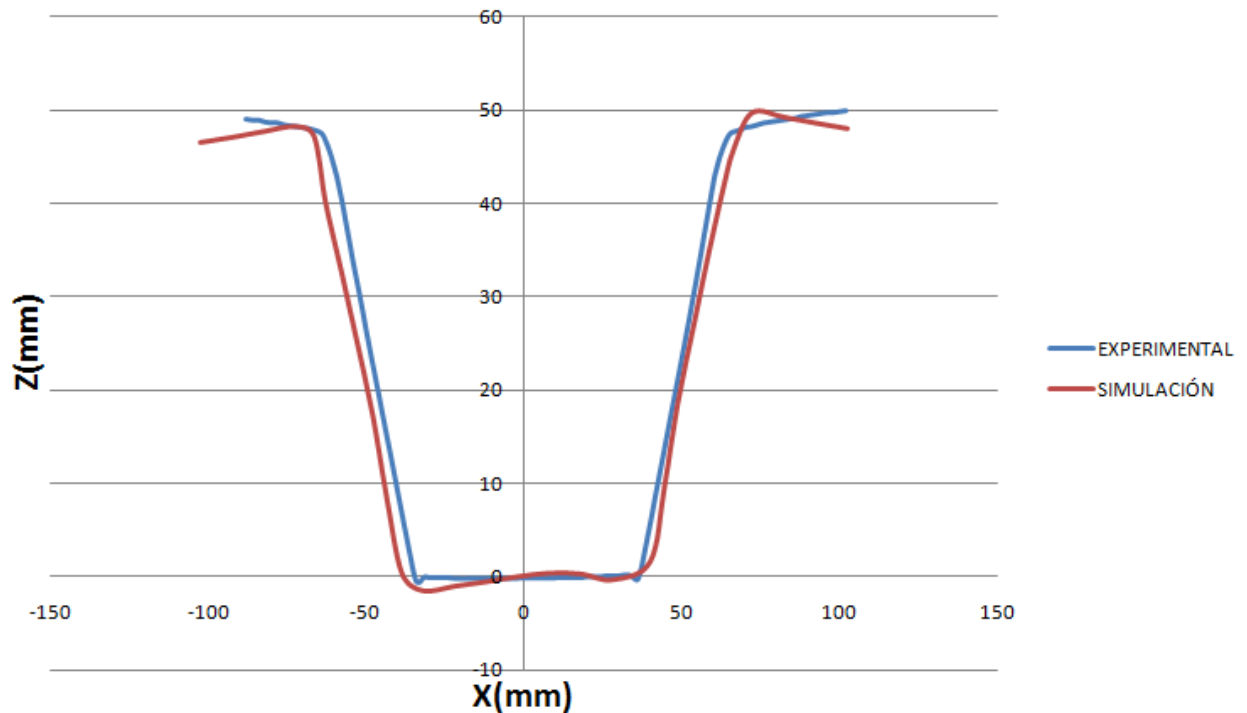
En las siguientes imágenes se va a mostrar la geometría de la chapa deformada obtenida experimentalmente y mediante simulación.



Se puede observar que a simple vista la geometría obtenida mediante simulación es bastante parecida a la geometría obtenida mediante experimentación.

5.2. Perfil

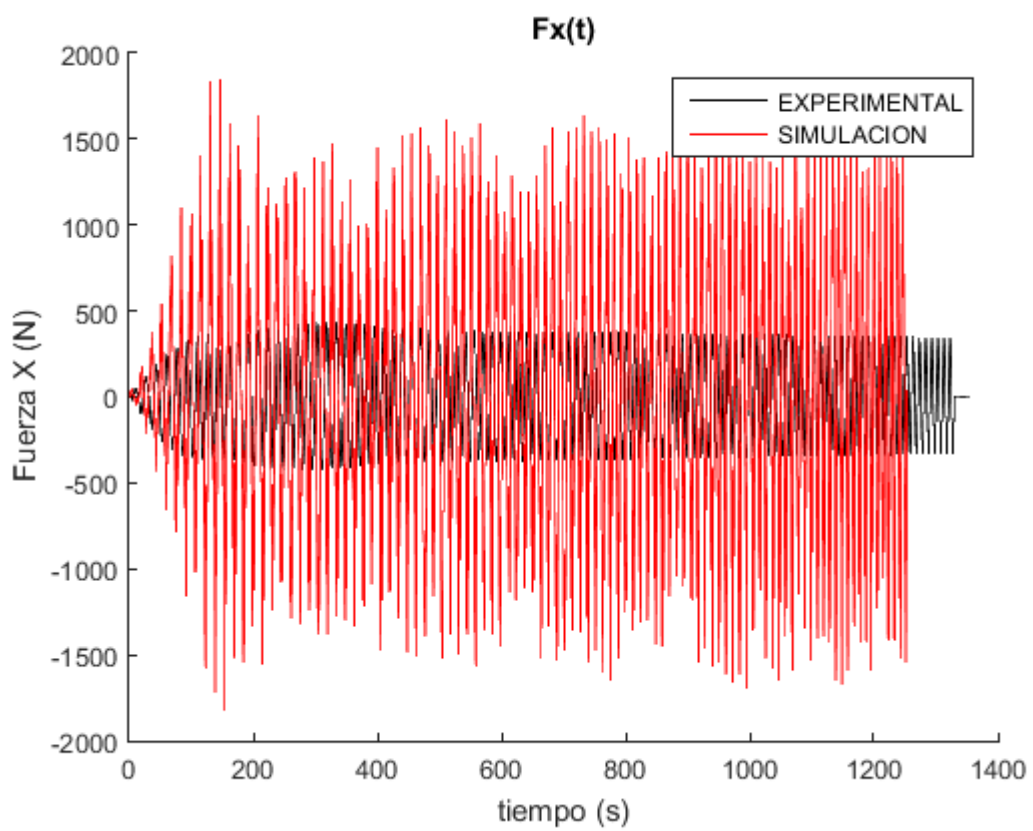
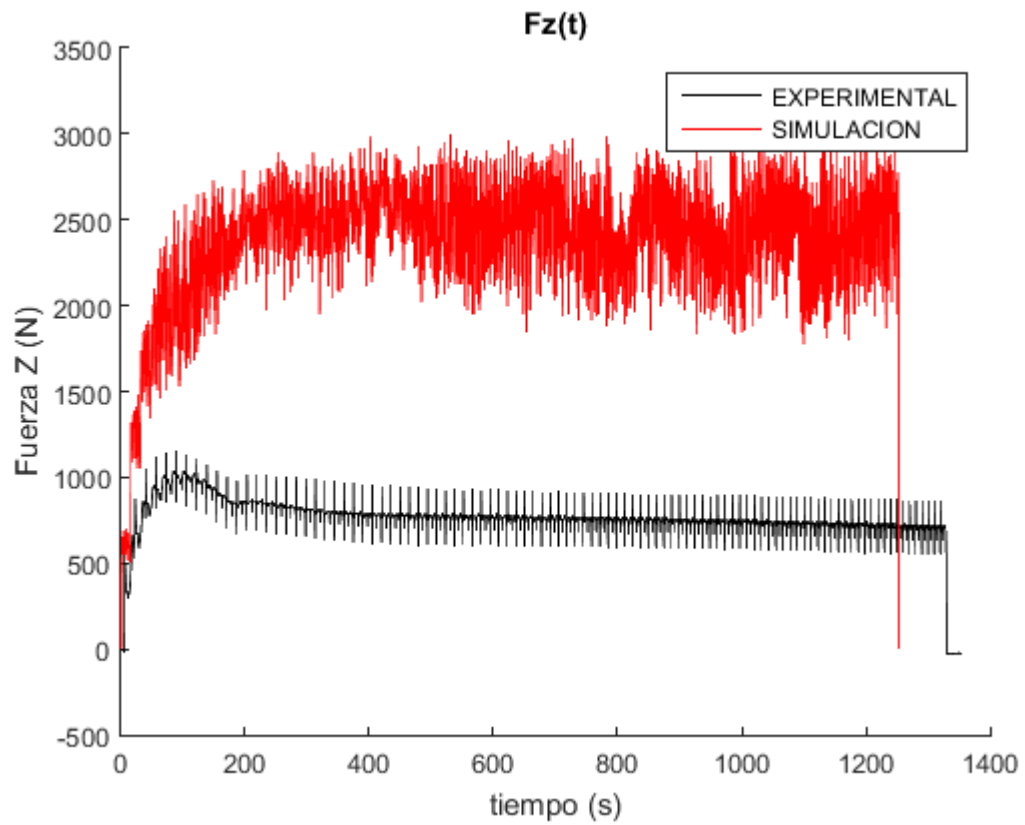
Se ha graficado el perfil obtenido experimentalmente y mediante simulación para poder así apreciar las diferencias.

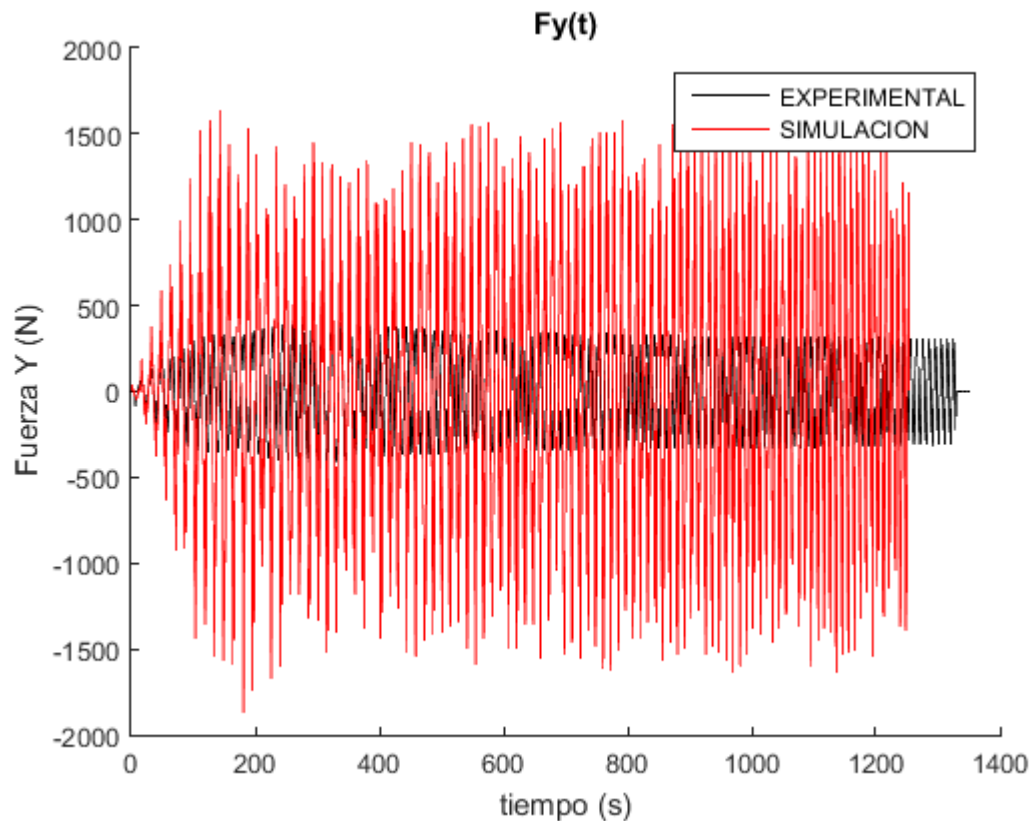


Se observa que la geometría obtenida mediante simulación se ajusta bastante bien al resultado obtenido experimentalmente, por lo tanto se podría usar el modelo creado en Abaqus para predecir el resultado de geometría que se va a obtener cuando se programen diferentes trayectorias del punzón que realiza la deformación

5.3. Fuerza

Se va a realizar la comparación entre las fuerzas, para ello se han dibujado tres gráficas, una para cada una de las fuerzas en los ejes X, Y, Z.





En este caso, podemos ver que las fuerzas obtenidas mediante el programa de elementos finitos son mucho mayores que las medidas experimentalmente. Este hecho podría ser causado debido a diferentes causas. Entre ellas, la causa puede ser que en el modelo al definir el material deformable no se ha tenido en cuenta el efecto de la temperatura, por lo tanto todo el proceso se simula a temperatura constante. Como se ha podido ver en los ensayos experimentales, al trabajar con una temperatura mayor la fuerza realizada para obtener la deformación es menor, pero este efecto no se ha tenido en cuenta en el modelo creado.

Otra posible causa podría ser la incorrecta definición de la inercia en el cuerpo que realiza la función de punzón, por simplicidad se introdujo la masa aproximada del punzón que se ha utilizado en los ensayos experimentales, pero en realidad es difícil determinar la inercia ya que el punzón está acoplado a un portaherramientas que a su vez está conectado al cabezal del centro de mecanizado, por lo que conocer la masa de este conjunto en movimiento es complicado.

6. CONCLUSIÓN

A lo largo de la ejecución del presente trabajo, se ha podido ver el potencial del método de deformación incremental como método de prototipado rápido para conseguir ciertas formas en placas de plástico de pequeño espesor. Se ha conseguido adaptar de forma sencilla y con relativamente pocos recursos un centro de mecanizado convencional, presente en la mayoría de los talleres mecánicos, en una máquina de deformación incremental monopunto. Esto nos lleva a decir, que con una pequeña inversión de dinero se puede aportar versatilidad a un centro de mecanizado.

Debido al potencial de este método y a los pocos estudios realizados hasta la fecha sobre él, en este trabajo se ha estudiado la influencia de diferentes parámetros en la geometría final obtenida mediante deformación incremental. Se realizaron medidas de fuerza y temperatura en diferentes ensayos, llegando a la conclusión de que con un aumento de la temperatura del proceso se obtiene una disminución general de la fuerza ejercida por el punzón que realiza la deformación, sin que la geometría de perfil obtenida sufra variaciones significativas. Sin embargo, hay que controlar muy bien esta temperatura de trabajo, variando la velocidad de giro, ya que si se sobrepasa la temperatura de transición vítrea del plástico se puede producir el fallo, produciendo el fallo de la placa que se está deformando. También se ha medido la rugosidad en la zona deformada de las diferentes placas, para poder así caracterizar el acabado superficial obtenido con diferentes velocidades de giro del punzón y usando punzones de diferentes materiales. De esta forma, se pudo ver que se conseguía mucho mejor acabado superficial utilizando el punzón de aluminio que utilizando el de acero. Con respecto a la influencia de la velocidad de giro no se pudieron sacar conclusiones claras, ya que usando el punzón de acero el acabado superficial mejoraba al aumentar la velocidad de giro, mientras que utilizando el punzón de aluminio se conseguía el efecto contrario, el acabado superficial empeoraba con el aumento de la velocidad de giro.

Por otro lado también se ha configurado un modelo en un software de elementos finitos para poder predecir el resultado del proceso, sin tener la necesidad de realizar ensayos experimentales. Se ha conseguido crear un modelo que obtiene, con un margen de error aceptable, la misma geometría que la obtenida mediante

experimentación. Por el contrario, no se han conseguido los resultados esperados en la fuerza obtenida mediante simulación, obteniéndose valores mayores que los obtenidos experimentalmente. Esta variación podría ser causada debido a una mala aproximación en la inercia del modelo o a la influencia de la temperatura la cual no se ha configurado en el modelo creado.

Dentro de la creación del modelo, también se ha optimizado el tiempo de computación del proceso mediante el uso de factores de tiempo, en inglés time scaling. Se ha llegado a la conclusión que mediante el uso de un scaling de 1000 se obtienen resultados muy similares a los obtenidos mediante un scaling de 100. Sin embargo, el tiempo de simulación es de 3 horas con un factor de tiempo de 1000, frente a las 36 horas usando un time scaling de 100. Aunque si aumentamos demasiado este factor, por ejemplo con un factor de 10000, los resultados obtenidos no son aceptables.

7. TRABAJOS FUTUROS

En trabajos futuros se podrían realizar ensayos experimentales, utilizando los mismos instrumentos de medida que los utilizados en el presente trabajo, pero estudiando la posibilidad de usar diferentes trayectorias para obtener la misma geometría final, para poder ver la influencia de estas trayectorias en el resultado obtenido.

Por otro lado, también se podrían realizar ensayos experimentales para ver la influencia de otras variables en el resultado del proceso, por ejemplo, se podrían realizar ensayos utilizando plásticos diferentes y variando el espesor de las placas.

Otra posible línea de trabajo, podría ser la creación de un modelo de elementos finitos, que trabaje con un solver implícito, para poder ver las diferencias con el solver explícito. También se podría estudiar la introducción en el modelo de la influencia de la temperatura, para lo que se deberían realizar los ensayos correspondientes para caracterizar las constantes de la ecuación de Jonhson Cook.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Romero-Carrillo P., Aguilar-Contreras F. J., Dorado-Vicente R., López-García R. (2013) *FABRICACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS PARA AUTOMOCIÓN MEDIANTE DEFORMACIÓN INCREMENTAL DE CHAPA*. DYNA Ingeniería e Industria.
- [2] Ruiz Ferrete F. J. (2014) *Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio AA 7075-O*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- [3] González Lozano M.J. (2015) *Estudio mediante elementos finitos de un proceso SPIF*. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
- [4] Guerrero Muñoz B. (2014) *Aplicación del conformado incremental mono-punto al diseño de una prótesis médica individualizada*. Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.
- [5] Ruiz Ferrete F. J. (2014) *Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio AA 7075-O*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- [6] Romero-Carrillo P., Aguilar-Contreras F. J., Dorado-Vicente R., López-García R. (2013) *FABRICACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS PARA AUTOMOCIÓN MEDIANTE DEFORMACIÓN INCREMENTAL DE CHAPA*. DYNA Ingeniería e Industria.
- [7] Bagudanch I., Garcia-Romeu M.L., Centeno G., Elías-Zúñiga A., Ciurana J. (2015) *Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride*. Journal of Materials Processing Technology.
- [8] Henia A., Bahloul R., Belhadjsalah H. (2013) *Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum*. International Journal of Material Forming.
- [9] Skjødt, M., Bay, N., & Lenau, T. A. (2008). *Rapid Prototyping by Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*. Technical University of Denmark.

- [10] Jackson K., Allwood J. (2009) *The mechanics of incremental sheet forming*. Journal of Materials Processing Technology.
- [11] Centeno G., Bagudanch I., Martinez-Donaire A.J., García-Romeu M.L., Vallellano C. (2014) *Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming*.
- [12] (2011) *Getting Started with Abaqus Interactive Edition*. Simulia