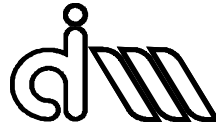


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

Presentado por: D. Salvatore Alessandro Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor

Valencia, septiembre de 2018

Indice

Capítulo 1	INTRODUCCION	15
1. 1.	Objetivo	16
1. 2.	Organización y desarrollo	16
Capítulo 2	PROCESOS DE MECANIZADO	19
2. 1.	Antecedentes.....	19
2. 2.	Fundamentos de mecanizado	21
2. 3.	Herramientas de corte.....	25
2. 3.1.	Geometría de la herramienta	25
2. 4.	Tipologías de mecanizado	30
2. 5.	Maquinas herramientas	31
Capítulo 3	MECANIZADO DE SUPERFICIES COMPLEJAS.....	35
3. 1.	Fresado de flanco de superficies complejas.....	35
3. 2.	Fresado de flancos en 5 ejes de superficies esculpidas complejas	39
3. 3.	Generación de trayectorias de fresado	41
3. 4.	Estrategias de mecanizado	48
Capítulo 4	PLAN DE PROCESOS DE MECANIZADO	53
4. 1.1.	Pieza.....	54
4. 1.2.	Material Toolox 44.....	55
4. 1.3.	Maquina Gentiger GT-66V.....	57
4. 1.4.	Herramientas.....	60
4. 1.5.	Teoría de fresado.....	64
4. 1.6.	Cálculo de datos de corte	69
4. 1.7.	Configuración herramientas Mitsubishi en Fusion 360.....	76

4. 1.8.	Diseño y requisitos de la pieza a modelar	81
4. 1.9.	Modelado de la pieza	81
4. 1.10.	Pre-test con a la herramienta Fusion 360	82
4. 1.11.	Diseño de la pieza definitiva y preparación del entorno de trabajo mediante Fusión 360	95
4. 1.12.	Programación de mecanizado con el software Fusión 360	97
4. 1.13.	TEST 1:	98
4. 1.14.	TEST 2:	114
4. 1.15.	TEST 3:	120
Capítulo 5	CONCLUSIONES.....	127
Capítulo 6	Trabajo futuro.....	129
Capítulo 7	BIBLIOGRAFIA	131

AGRADECIMIENTOS

Escribir este trabajo ha tenido un gran impacto en mí, ha sido un periodo de aprendizaje profesional y personal.

Primero de todo me gustaría agradecer a mi Tutor Carlos por haberme dado la posibilidad de aprender mucho sobre el mecanizado, apoyándome en todas las fases de investigación y readaptación de este trabajo.

Quiero agradecerles a mis padres y hermanas todo el apoyo mostrado durante esta etapa de mi vida, ya que, aunque han sido meros espectadores de ella, han hecho posible que sea más fácil y llevadera, pues sin ellos no habría podido llegar hasta aquí.

Mis amigos y compañeros del master que han contribuido en mi fase de aprendizaje
Y unas gracias especial va a Emma que estos últimos días ha sido un pilar y un gran empuje para terminar este trabajo.

¡Muchas gracias a todos!

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster se centra en el estudio del mecanizado y de sus principios generales para luego analizar el campo de mecanizado de superficies complejas donde las maquinarias de control numérico de 3 o más ejes trabajan modelando piezas tal vez muy complejas sin interferencias y dando como resultado un acabado superficial que no se logra obtener con otros procesos de conformado.

El objetivo de este trabajo fin de master es crear un código máquina lo más ajustado posible que permita el procesamiento de piezas con el menor desgaste de material, tiempo y coste de fabricación. Para lograr esto, se hará uso de las herramientas software de simulación utilizadas hoy en día en el mercado para evaluar las posibles estrategias en el caso de operaciones de mecanizado de superficies complejas. Dichas simulaciones deberán compararse con una serie de experimentos utilizando herramientas de la marca Mitsubishi para poder validar un modelo cuyo objetivo será minimizar tiempos, coste e impacto ambiental de estas operaciones en el marco de la Fabricación sostenible.

El conocimiento teórico y la experiencia en los procesos de mecanizado serán de fundamental importancia, con los recursos de máquina herramientas y se dispondrá de varias herramientas de simulación de mecanizado, entre todas se prestará especial interés en la herramienta Fusión 360 con la cual se creará el código maquina definitivo. Como resultado final se generará una guía para el mecanizado de superficies que permita obtener las mejores estrategias en función de requerimientos de diseño como tolerancias o acabados superficiales.

Palabras Clave: Mecanizado, mecanizado de superficies complejas, mecanizado multi-eje, Fusión 360, software simulación, Mitsubishi herramientas.

RESUM

Este Treball Fi de Màster se centra en l'estudi del mecanitzat i dels seus principis generals per a després analitzar el camp de mecanitzat de superfícies complexes on les maquinàries de control numèric de 3 o més eixos treballen modelant peces tal vegada molt complexes sense interferències i donant com resultat un acabat superficial que no s'aconsegueix obtenir amb altres processos de conformat.

L'objectiu d'este treball fi de màster és crear un codi màquina el més ajustat possible que permeta el processament de peces amb el menor desgast de material, temps i cost de fabricació. Per a aconseguir açò, es farà ús de les ferramentes programari de simulació utilitzades hui en dia en el mercat per a avaluar les possibles estratègies en el cas d'operacions de mecanitzat de superfícies complexes. Les dites simulacions hauran de comparar-se amb una sèrie d'experiments utilitzant ferramentes de la marca Mitsubishi per a poder validar un model l'objectiu del qual serà minimitzar temps, cost i impacte ambiental d'estes operacions en el marc de la Fabricació sostenible.

El coneixement teòric i l'experiència en els processos de mecanitzat seran de fonamental importància, amb els recursos de màquina ferramentes i es disposarà de diverses ferramentes de simulació de mecanitzat, entre totes es prestarà especial interès en la ferramenta Fusió 360 amb la qual es crearà el codi màquina definitiu. Com resultat final es generarà una guia per al mecanitzat de superfícies que permeta obtenir les millors estratègies en funció de requeriments de disseny com a toleràncies o acabats superficials.

Paraules clau: Mecanitzat, mecanitzat de superfícies complexes, mecanitzat multi-eje, Fusió 360, programari simulació, Mitsubishi ferramentes.

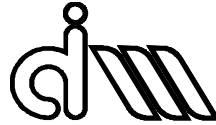
ABSTRACT

This Master Thesis focuses on the study of machining and its general principles to then analyze the field of machining of complex surfaces where numerical control machineries of 3 or more axes work modeling pieces maybe very complex without interference and giving as result in a surface finish that cannot be achieved with other forming processes. The objective of this master's work is to create a machine code as tight as possible that allows the processing of parts with the least wear of material, time and manufacturing cost. To achieve this, the simulation software tools used in the market today will be used to evaluate the possible strategies in the case of complex surface machining operations. Said simulations should be compared with a series of experiments on one or several Mitsubishi brand machine tools in order to validate a model whose objective will be to minimize the time, cost and environmental impact of these operations within the framework of Sustainable Manufacturing. To do this, we will have theoretical knowledge and experience in the machining processes, with the resources of machine tools and several machining simulation tools will be available, among them special interest will be given to the Fusion 360 tool with which it will be created the definitive machine code. As a final result, a guide for the machining of surfaces will be generated to obtain the best strategies according to design requirements such as tolerances or surface finishes.

Key Words: Machining, machining of complex surfaces, multi-axis machining, Fusion 360, simulation software, Mitsubishi tools.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

MEMORIA

Presentado por: D. Alessandro Salvatore Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor

Valencia, septiembre de 2018

Capítulo 1 INTRODUCCION

El primer capítulo de este Trabajo fin de Máster incluye los objetivos y organización del proyecto, teniendo como objetivo justificar la naturaleza, originalidad y la relevancia del mismo.

El mecanizado, proceso de arranque de viruta, se utiliza para modificar dimensiones, formas y grado de acabado superficial de las piezas quitando parte del material que se convierte en viruta. Para crear una pieza con el proceso de mecanizado se llega a veces a formar un 70-90% de viruta desde el material componente la pieza original. Por este motivo, el proceso de mecanizado es un proceso muy costoso debido a la gran cantidad de material que se pierde durante la modelación y a la energía gastada para realizarlo.

Las numerosas ventajas hacen de este proceso uno de los más comunes en el campo de la modelación:

- En tema de dimensiones se logra una gran precisión.
- Conserva las propiedades mecánicas y físicas del material.
- Con el mecanizado se pueden realizar diferentes formas.
- Estos procesos son fáciles de automatizar.
- Los acabados superficiales son muy buenos.

Sin embargo, presenta algunas desventajas.

- La gran cantidad de viruta generada no se puede reutilizar.
- Es un proceso en el que entran en juego numerosas fuerzas y velocidades que hacen que las máquinas herramientas necesiten de una gran cantidad de energía.
- Tal vez la programación de la máquina herramienta para producir una pieza requiere mucho tiempo y horas dedicadas.
- Las dimensiones de las máquinas limitan los tamaños de las piezas que se pueden producir.
- El tiempo dedicado para la programación de las máquinas y el material gastado para la producción de las piezas hacen de este proceso uno de los más caros y poco rentable cuando el tamaño del lote no sea muy elevado. [1]

1. 1. Objetivo

El objetivo de este Trabajo Fin de Master es llevar a cabo un estudio del mecanizado partiendo de las características generales, analizando sus aspectos fundamentales, pasando por el estudio de mecanizado de superficies complejas desde el aspecto teórico para luego llegar, utilizando herramientas de cálculo, a la generación de un código máquina, optimización del mismo y a la creación de una guía donde se detallarán los procedimientos útiles para obtener un proceso cuanto más eficiente posible.

Para cumplir con el cometido del proyecto, los siguientes objetivos específicos son propuestos:

- Estudio teórico del mecanizado partiendo desde los inicios, analizando las varias tipologías de mecanizado, máquinas herramientas y materiales de las herramientas.
- Definición de una superficie compleja sencilla para el primer estudio, diseño y creación del código máquina.
- Análisis de los resultados del primer estudio y planteamiento de las correcciones y mejoras.
- Diseño de una superficie definitiva, creación del código máquina y estudio del proceso optimizado.
- Creación de una guía que sirva como ayuda a la hora de utilizar las herramientas CAD-CAM.
- Análisis del resultado y formulación de las conclusiones.

1. 2. Organización y desarrollo

El Capítulo 1 sirve para plantear los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de este Trabajo Fin de Master, así como la organización que es usada.

En el capítulo 2 se presentan las bases de la teoría del mecanizado partiendo de los antecedentes y desarrollos de las varias técnicas de mecanizado para llegar a nuestros días donde se utilizan máquinas y centros de control numérico.

En el capítulo 3 se expone la planificación de la producción con todas las fases a seguir para partir desde una idea general y llegar a la fabricación de una o más unidades de una determinada pieza tramite el proceso del mecanizado. Este capítulo incluye la teoría de corte y los cálculos hechos para el desarrollo de este trabajo en concreto.

En el capítulo 4 se colocan las conclusiones y posibles soluciones.

En el capítulo 5 viene expuesto un presupuesto aproximativo de cuánto costaría desarrollar esta pieza. Se detallan aquí los costes materiales, las horas de trabajo, el tiempo máquina y los costes de las herramientas.

En el capítulo 6 están los anexos con los planos de la pieza y una hoja de procesos de mecanizado creada con la idea de dar al operador una idea general de cómo se tiene que mecanizar la pieza siguiendo todas las 5 fases.

Finalmente , en el capítulo 7 se relaciona la bibliografía utilizada.

Capítulo 2 PROCESOS DE MECANIZADO

2. 1. Antecedentes

Para llegar a las máquinas de control numérico empleadas hoy en día se ha pasado por una serie de fases de desarrollo, partiendo desde su historia, pasando por las máquinas a vapor para la generación de energía hasta llegar a los primeros tornos automáticos. Los primeros materiales tratados fueron la madera y la piedra, los egipcios empleaban mecanismos complejos para la creación de taladros. El torno de pértiga inventado alrededor del 1250 fue una de la primera maquinaria. [1][2]

La evolución del corte de los metales ha sido notable hasta la llegada de las primeras máquinas de control numérico. Hoy en día estas máquinas son capaces de cumplir operaciones complejas ejecutando un programa previamente creado. Estos procesos se han desarrollado gracias al desarrollo de mecanismos que permiten articular el movimiento de corte por ejemplo la libertad de moverse a lo largo de 5 ejes y la investigación que nos ha llevado a descubrir nuevos materiales para las herramientas.

En el siglo XV se inventó el primer torno accionado por correa y manivela, después se diseñó un torno útil para roscar, luego se construyó la primera máquina cepilladora y se inventaron los contrapuntos y mandril para el torno. [1][2]

En 1774 se construyó la primera máquina mandriladora. En el 1800 se construyó el primer torno cortador de tornillos, y en el 1818 fue inventada la primera máquina fresadora. Se tuvo que esperar hasta el 1842 para ver el primer torno automático, gracias a la invención de la máquina de vapor se pudo automatizar el movimiento de avance de la herramienta. En el 1851 fue publicado el primer estudio sobre el corte de metales. [1][2]

En el 1861 nació la primera fresadora universal y en 1871 se inventaron las herramientas de aleaciones de acero. Estos años fueron años de estudio y publicaciones sobre geometría de viruta, fuerzas de corte y deformación plástica. El primer torno con cargador automático nació en el 1898. [1][2]

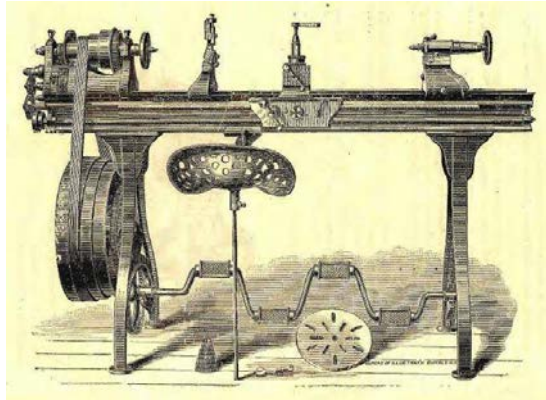


Figura 1. Torno con pedal y rueda

En 1906 se construyeron herramientas de acero rápido con adición de vanadio. A lo largo de los años se han estudiado y descubierto nuevos materiales para las herramientas que consentían mayores velocidades de corte, estos han influido notablemente en los procesos de mecanizado. [1] [2]

Las primeras herramientas que llevaban un recubrimiento cerámico fueron desempeñadas en los años alrededor de 1955. Éstas garantizaban una mayor dureza superficial aumentando así la velocidad de corte y consiguiendo una reducción de la energía gastada para estos procesos.

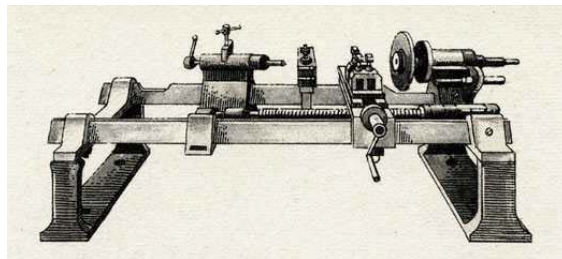


Figura 2. Primer torno de gran precisión

Entre la década de los setenta y ochenta, se produce un gran impulso de la informática y la electrónica, apareciendo los primeros microprocesadores y circuitos impresos. Éstos, permitieron integrar computadoras completamente en el interior de las máquinas de mecanizado, de tal forma que estas dejaron de seguir ciegamente las instrucciones de los programas sin tener en cuenta otra serie de factores, siendo el caso de las máquinas de control numérico (NC). Estas nuevas podían calcular mecanizados tridimensionales, trayectorias óptimas, analizar movimientos,

comunicarse con el usuario, surgiendo de esta forma lo que hoy en día conocemos como control numérico computarizado (CNC). Como podemos observar, la gran diferencia entre control numérico y control numérico computarizado radica en la capacidad del controlador, es decir, las máquinas de CN solo se limitan a seguir instrucciones mientras que las de CNC además analizan la información.

Como resultado, se obtuvo la construcción de máquinas de control numérico y centros de mecanizados siempre más complejos. Hoy en día los centros de mecanizado son capaces de realizar varias operaciones de corte secuencial siguiendo y analizando un programa derivado de un software CAD/CAM. [1] [2] [3]



Figura 3. Centro de mecanizado moderno

2. 2. Fundamentos de mecanizado

Con el Proceso del mecanizado somos capaces de obtener geometrías, tolerancias y acabados superficiales no obtenibles con otras técnicas de conformado. La pérdida de material y la energía necesaria para arrancar el material hacen del mecanizado uno de los procesos de conformado más costosos. Por este motivo muchas veces se suele utilizar un material de partida que tenga forma y dimensiones próximas a las de la pieza que se desea obtener. En algún caso se obtiene directamente la geometría de la pieza desde un proceso de fundición, y el proceso de mecanizado sirve solo para dar a la pieza, o a unas superficies de ésta, un acabado superficial que respete las tolerancias de diseño. Las máquinas herramientas son esas máquinas que se utilizan para los procesos de arranque de viruta. Este proceso se realiza gracias a un movimiento relativo entre la pieza y la herramienta. Estos movimientos relativos

vienen generados a través de las máquinas herramientas que conllevan la energía necesaria para este proceso. La herramienta arranca una sección de material de altura t llamada profundidad de corte $t = \frac{Df - Di}{2}$ y ancho a moviéndose en línea recta. Este movimiento se llama movimiento de corte **Mc**. Una vez que el útil ha llegado al final de la pieza vuelve a su posición de partida sin arrancar material y la pieza avanza para poner otra porción de material sin mecanizar enfrente de la herramienta. A este movimiento de la pieza se le llama movimiento de avance **Ma**. [1][2][3]

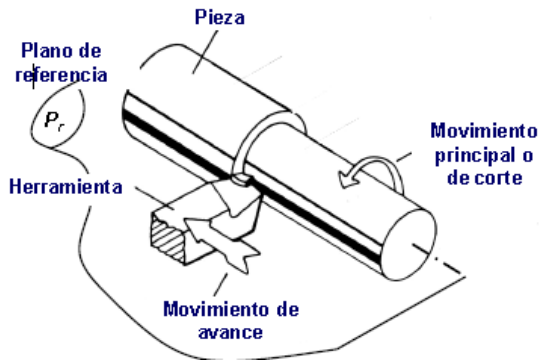


Figura 4. Movimientos de corte

El movimiento de corte y de avance pueden ser circulares o lineales y pueden ser llevados desde la herramienta o desde las piezas indistintamente

En la tabla de abajo se puede ver como se combinan estos dos movimientos en las varias máquinas herramientas:

Herramienta	Mov.	Tipo mov.	Portador
Limadora	M_c	Lineal	Herramienta
	M_a	Lineal	Pieza
Cepilladora	M_c	Lineal	Pieza
	M_a	Lineal	Herramienta
Torno	M_c	Circular	Pieza
	M_a	Lineal	Herramienta
Fresadora	M_c	Circular	Herramienta
	M_a	Lineal	Pieza
Taladradora	M_c	Circular	Herramienta
	M_a	Lineal	Herramienta

Tabla 1. Movimientos de máquinas

Además del movimiento de avance y del movimiento de corte, el mecanizado está caracterizado también por la velocidad de corte **Vc** y la velocidad de avance **Vf** como se muestra en la figura 5. [2][3][4]

$$V_c = \frac{\pi D n}{1,000}$$

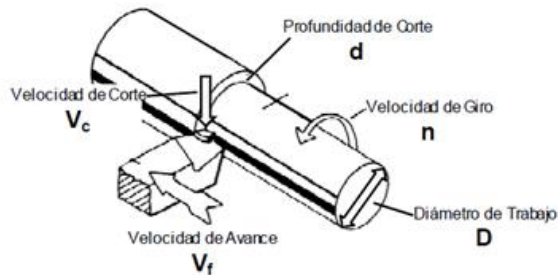


Figura 5 Velocidades y profundidad de corte

En el proceso de mecanizado las velocidades de corte y de avance son muy importantes a la hora de determinar y estudiar el tiempo máquina, ese tiempo empleado por la maquina para producir una pieza.

Otro factor muy importante a tener en cuenta a la hora de diseñar o elegir una herramienta son los ángulos de corte definidos como sigue:

α = Ángulo de devastado

ϕ = Ángulo del plano de corte

h = Profundidad de corte

tc = Espesor de la viruta

rc = Razón de espesor de viruta y profundidad de corte [3][4]

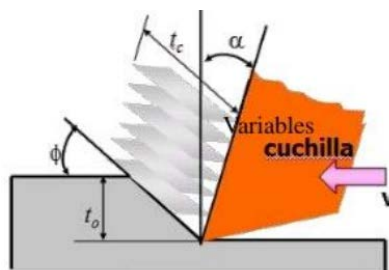


Figura 6. Ángulo de corte

Los factores que influyen sobre el proceso de corte son:

PARAMETRO	INFLUENCIA
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluido de corte	Fuerzas, potencias, aumento de la temperatura, vida de la herramienta, tipo de viruta, acabado superficial
Ángulos de la herramienta	Igual que arriba; influencia sobre dirección de flujo de viruta, resistencia de la herramienta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; no deseable en maquinado automatizado
Viruta de borde acumulado	Mal acabado superficial; si el borde acumulado es delgado puede proteger la superficie de la herramienta.
Viruta discontinua	Preferible para la facilidad al desecho de viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar el acabado superficial y causar vibración y traqueteo.
Aumento de la Temperatura	Influye sobre la vida de la herramienta, en especial sobre el desgaste de cráter, y la exactitud dimensional de la pieza; puede causar daños térmicos a la superficie de la pieza.
Desgaste de la herramienta	Influye sobre el acabado superficial, la exactitud dimensional, aumento de T^a , fuerzas y potencia.
Maquinabilidad	Se relaciona con la vida de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia.

Tabla 2. Factores influyentes en el proceso de corte

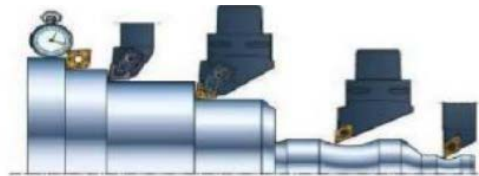
2. 3. Herramientas de corte

En los procesos de mecanizado las herramientas juegan un papel fundamental, por esto para evitar posibles rupturas, desgaste avanzados o mecanizados de escasa calidad hay que elegir correctamente que tipología de herramienta utilizar para cada y uno de los procesos programados. [1][2][3]

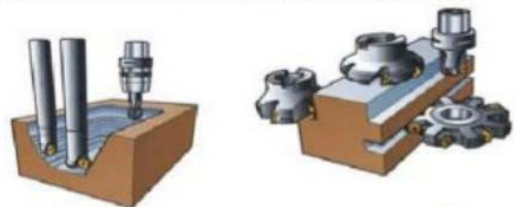
Se define herramienta aquel elemento encargado de remover el material desde la pieza base, esta herramienta puede tener uno o más hilos de corte. Además, clasificamos cada herramienta a partir del tipo de operación que vaya a realizar, dimensiones y configuración geométrica.

Las herramientas utilizadas en los procesos de mecanizado son muy diferentes según la tipología de mecanizado. En la figura se pueden ver las distintas herramientas empleadas en cada y uno de los diferentes procesos. [1][2][3]

Herramientas de torneado:



Herramientas de fresado:



Herramientas de taladrado:



Figura 7. Herramientas de corte

2. 3.1. Geometría de la herramienta

Según la operación de mecanizado a realizar se escoge la herramienta con la geometría más adecuada. Vamos a analizar las tipologías más comunes de geometría y para qué tipología de mecanizado se emplean. [3][4]

Una primera clasificación sería según el número de filos de corte, hay dos grandes tipologías: de único filo de corte y de múltiples filos de corte. Dentro del primer grupo

se identifican las operaciones de torneado, mientras que dentro del segundo grupo se encuentran el fresado y el taladrado operaciones caracterizadas por la rotación de la herramienta o de la pieza. Centraremos nuestra atención sobre las geometrías de múltiple filo siendo nuestro caso de estudio en el mecanizado de superficies complejas. A continuación, se expondrán las geometrías características en este grupo. [3][4]

Fresado: Las herramientas que se emplean en las operaciones de fresado son caracterizadas para presentar el filo de corte en la periferia y/o en su cara frontal. Una de las ventajas con respecto al monofilos es que las temperaturas más bajas de trabajo hacen que el desgaste sea menor. Las herramientas de fresado pueden ser con y sin mango, las más utilizadas en los centros de mecanizado son las de mango mientras que las otras se suelen utilizar para piezas de grandes tamaños debido a sus dimensiones.



Figura 8. Herramientas sin mango

- **Fresa esférica:** En esta tipología de fresa los filos de corte están dispuestos a lo largo de un contorno esférico, esto permite realizar operaciones de fresado radial o axial. El radio puede variar según la dimensión del contorno esférico. Se suelen emplear para operaciones de desbaste y de acabado superficial con formas complejas y superficies curvas. También se pueden utilizar en cajeado cuando se requiere un radio de redondeo entre dos superficies perpendiculares. Se suelen emplear en máquinas multi-eje para aprovechar al máximo sus geometrías.



Figura 9. Fresa esférica

-**Fresa tórica:** Es una fresa cilíndrica caracterizada por un radio entre la parte inferior y la periférica de ésta. Se emplea para el cajeado y contornado porque tiende a dar un buen acabado superficial en el plano perpendicular al eje de revolución. Se consiguen con esta fresa esquinas redondas muy empleadas por esta característica para la creación de moldes.



Figura 10. Fresa tórica

-**Fresa plana:** Similar a la fresa tórica no presenta radio en su parte inferior, diseñada para fresado perpendicular al eje de revolución. Útil para el contorneado, planeado y generación de esquinas rectas. No se consigue con esta fresa operaciones axiales por esto en el cajeado se necesita de un foro de entrada previamente realizado



Figura 11. Fresa plana

- **Fresa de ranurar:** tiene la geometría de una T invertida y está caracterizada por tener los filos de corte en toda su periferia, pero no en la zona frontal. Se utiliza para operaciones de ranurado y contorneado.



Figura 12. Fresa ranurar

-**Fresa cónica:** Presenta forma de cono en los cuales están ubicados los filos de corte. Viene utilizada para la creación de avellanados.



Figura 13. Fresa cónica

-Fresa angular: Ésta también presenta un cuerpo cónico que puede ser invertido y no invertido. Se emplea para la creación de ranura con formas especiales como achaflanado y bordes.



Figura 14. Fresa angular

Taladrado: Herramientas empleadas solamente para hacer taladros en las piezas a mecanizar, están caracterizadas por tener una relación longitud-diámetro elevada. Dependiendo de la operación que se desea realizar a la hora de taladrar se utilizará una u otra herramienta.

-Broca: Es la herramienta utilizada para hacer agujeros. Pueden presentar filos secundarios situados en la periferia que sirven para agrandar los agujeros y dar un mejor acabado superficial. Las ranuras muy marcadas sirven para la evacuación de la viruta.



Figura 15. Broca

-Mandril: Se utiliza para ensanchar y agujerear, su geometría presenta ángulo de incidencia mínimo, apenas se encuentran filos de corte en su zona frontal siendo más pronunciados en la zona periférica. Esto es porque se trabaja en agujeros previamente realizados solo para agrandar o dar un mejor acabado superficial. Suelen llevar desde un solo filo de corte para pequeños diámetros hasta múltiples filos para diámetros mayores. Estas herramientas están compuestas por plaquetas de corte intercambiables.



Figura 16. Mandril

-Escariador: Se suele utilizar para obtener óptimos acabados superficiales y buenas tolerancias de los agujeros. Presenta por esto un elevado número de filos de corte todo alrededor de la herramienta. Estos filos pueden estar dispuestos en línea recta, a formar una hélice y oblicuos.



Figura 17. Escariador

Diseño y materiales de las herramientas de corte: A la hora de diseñar una herramienta de corte se tiene que tener en cuenta varios aspectos muy importantes que van a influir durante la vida útil de la pieza. Entre todos los más comunes son las grandes cargas mecánicas que accionan conjuntamente con las elevadas temperaturas de trabajo del orden de los 700°C. Las condiciones de fricción entre herramienta viruta y la superficie recién generada son muy severas.

Con estos aspectos particulares se intenta siempre conseguir:

- Alta estabilidad física y química a elevada temperatura.
- Alta resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo.
- Alta resistencia a la fractura frágil requiriendo una elevada tenacidad.

Una vez se hayan tomado estos parámetros como fundamentales para la creación de una herramienta resistente y de alta calidad, [3][4] los principales tipos de material utilizados son:

- Aceros rápidos denominados HSS (High Speed Steels)
- El metal duro compuesto de granos de carburo de Wolframio (CW) sinterizado con cobalto también nominado carburo cementado
- Materiales cerámicos formados por la alúmina o nitruro de silicio
- Diamante poli cristalino (PCD) y nitruro de boro cubico poli cristalino de elevada dureza comúnmente llamados “materiales extraduros”

En el diagrama de la figura se puede ver con qué porcentual se utilizan los materiales de herramientas. Se puede observar que casi el 75% del mercado está constituido por metal duro con y sin recubrimiento. Hay que distinguir dos tipos de empresas implicadas en la fabricación de materiales para herramientas y de herramientas. Aquellas que producen el material base como por ejemplo Thyssen, Mitsubishi, General Electrics, etc., y las que partiendo de una barra calibrada producen por

rectificado la herramienta rotativa (herramienta especial, fresas, etc.) dando su marca al producto final. Como se puede ver, el sector de las herramientas cuenta con empresas de distinto tamaño y tipo de negocio, con dinámicas de mercado distintas.

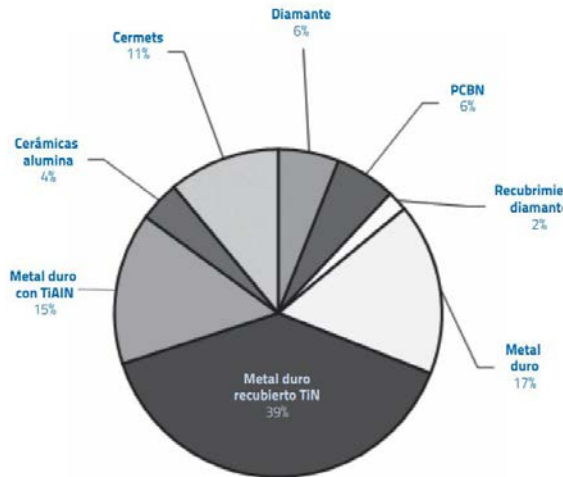


Figura 18. Porcentaje materiales de herramientas

2. 4. Tipologías de mecanizado

El mecanizado puede ser de diferentes tipologías, las más comunes son:

-Mecanizado sin arranque de viruta, todas las piezas metálicas, excepto aquellas fabricadas por fundición, están sometidas en algún momento de su fabricación a una operación de conformado del metal (procesos de manufactura en los que se usa la deformación para cambiar la forma de las piezas metálicas).[6]

-Mecanizado con arranque de viruta, tal y como indica el nombre, en los mecanizados con arranque de viruta el material es arrancado o cortado con la herramienta de corte adecuada, dando lugar a virutas metálicas, residuos inservibles para la empresa de mecanizado. Con esta técnica se producen procesos de desbaste, que eliminan de forma rápida una gran cantidad de material. Tras el desbaste, los procesos de acabado, para eliminar los restos de material con mucha precisión y finalizar así la fabricación de la pieza. Estos acabados pueden ser desde la simple limpieza, el bruñido, pulido, y terminaciones como lacado, nitruración y otro tipo de recubrimiento. La mayoría de las piezas fabricadas a gran escala se fabrican mediante este procedimiento. Además, desde algún tiempo, la informática aplicada a la automatización industrial ha hecho que los procesos más simples y manuales hayan evolucionado hacia la utilización de maquinaria de mecanizados CNC (Control

Numérico por Computadora). Así pues, hablamos de máquinas de gran versatilidad y altamente productivas, que permiten obtener elementos complejos terminados, con una precisión milimétrica. Uno de los mejores ejemplos de mecanizado por arranque de viruta es, precisamente, el mecanizado por decoletaje, en que el arranque de virutas se produce a partir de barras cilíndricas de los materiales con que la empresa pueda trabajar. [6]

-Mecanizado por abrasión, mediante este proceso se utiliza una muela abrasiva que al girar a gran velocidad y entrar en contacto con la superficie a moldear la va desgastando. La gran ventaja de este proceso de mecanizado es que permite una precisión dependiendo de la fuerza ejercida, por lo que en muchos casos el acabado es innecesario o muy superficial. Por otro lado, tiene como desventaja el tiempo requerido para realizar la tarea, pues el operario normalmente tiene que verificar regularmente la evolución del trabajo. [6]

2. 5. Maquinas herramientas

Las maquinas herramientas son las máquinas que permiten realizar las operaciones de mecanizado. Existen muchos tipos de máquinas herramientas cada y una diseñada para un proceso, las máquinas herramientas de mecanizado clásicas son:

1. Taladro: Se suele fijar la pieza sobre la mesa del taladro, movimiento de corte y de avance viene actuado por la herramienta llamada broca, realizando el mecanizado de un agujero o taladro teóricamente del mismo diámetro que la broca y de la profundidad deseada. Hoy en día hay taladros de control numérico muy precisos y automáticos.



Figura 19. Taladro

2. Limadora: una cuchilla viene montada sobre la porta herramienta para realizar el mecanizado. El movimiento de corte de la herramienta es lineal, sobre una pieza fijada a la mesa, que tiene el movimiento de avance perpendicular al movimiento de corte.



Figura 20. Limadora

3. Mortajadora : Con esta máquina se arranca el material linealmente e interiormente a los agujeros. El movimiento de corte lo efectúa la herramienta y el de avance la mesa donde se monta la pieza a mecanizar.



Figura 21. Mortajadora

4. Cepilladora: Está compuesta por una mesa deslizante que suporta la pieza y realiza el movimiento de corte deslizando longitudinalmente, la cuchilla se desplaza transversalmente en el movimiento de avance.



Figura 22. Cepilladora

5. Torno: una de las maquinas más utilizada en el mecanizado es el torno, éstas son en la industria las de uso más general, la pieza viene fijada sobre el plato, que, girando sobre su eje realiza el movimiento de corte. El movimiento de avance esta realizado por la cuchilla.



Figura 23. Torno

6. Fresadora: en esta máquina el movimiento de corte está actuado por la herramienta denominada fresa, esta gira sobre su eje cortando el material mientras el movimiento de avance viene efectuado por la pieza, fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Junto al torno son las dos máquinas más utilizadas y versátiles en el mundo del mecanizado.



Figura 24. Fresadora

7. Centro de mecanizado CNC: desde hace ya tiempo, la informática aplicada a la automatización industrial, ha hecho que las máquinas herramienta evolucionen hacia el control numérico. Así pues, hablamos de centros de mecanizado de 2,3,4 y hasta 5 ejes y tornos multifunción, que permiten obtener una pieza compleja, totalmente terminada, partiendo de una barra de metal y todo ello en un único amarre. Estas máquinas con control numérico, ofrecen versatilidad, altas capacidades de producción y preparación, ofreciendo altísima precisión del orden de micras. Son máquinas que juntan en sí casi todas las funcionalidades de las otras máquinas que acabamos de analizar.



Figura 25. Centro de mecanizado moderno CNC

Las maquinas herramienta de control numérico deben permitir el movimiento relativo entre la herramienta y la pieza. Para esto se interpolan los movimientos de varios ejes a la vez.

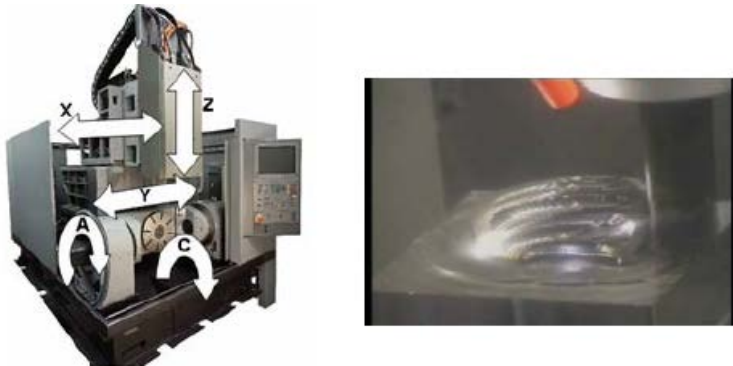


Figura 26. Interpolación continua en 5 ejes simultáneos

Además de la coordinación de los movimientos, estas máquinas deben tener una buena rigidez para contrastar las fuerzas de corte que se generan durante el proceso de mecanizado, pero a la misma vez tiene que poder amortiguar las vibraciones para poder garantizar un acabado superficial impecable.

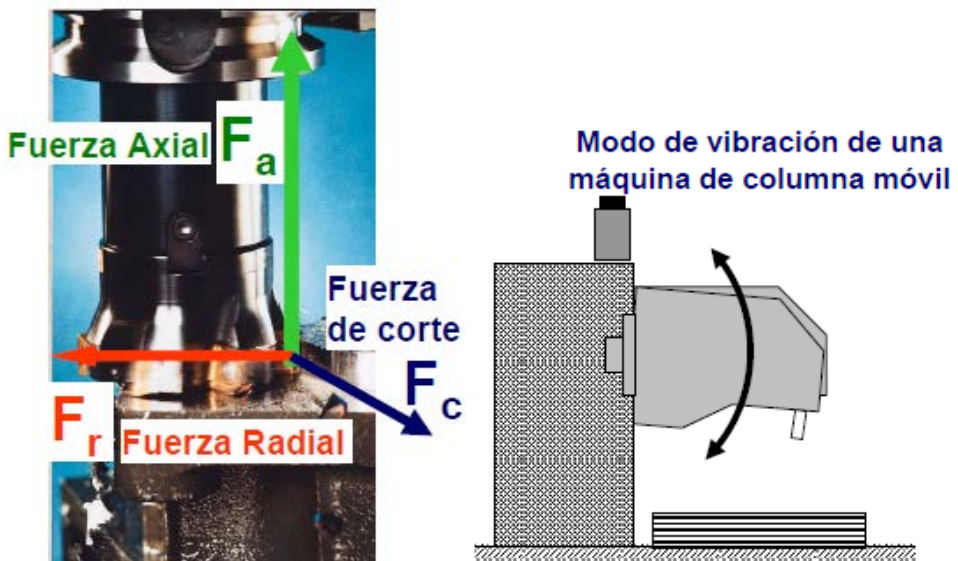


Figura 27. Fuerzas y vibraciones que actúan sobre las maquinas herramientas

Capítulo 3 MECANIZADO DE SUPERFICIES COMPLEJAS

El mecanizado de superficies esculpidas complejas es un tema tecnológico importante en la fabricación moderna, concretamente en el sector de moldes y matrices. Hoy en día, este sector, de gran importancia para la industria automotriz, aeronáutica y otras industrias avanzadas, se encuentra en todos los países industrializados o emergentes. En el pasado reciente, la tecnología tradicional empleada en la fabricación de moldes y matrices era una combinación de fresado convencional y mecanizado por electrodescarga (EDM) o electroquímica (ECM). Hoy en día, el fresado de alta velocidad (HSM) se utiliza en desbaste, semiacabado y acabado de moldes y troqueles con gran éxito. Esta tecnología requirió modernos sistemas CAM y planificación de procesos para el mecanizado de 3 y 5 ejes. El proceso HSM (High speed machining) presenta varias ventajas en comparación con la tecnología tradicional en términos de precisión y rugosidad de la pieza de trabajo, así como en el pulido manual después de las operaciones de mecanizado. Vamos a analizar el fresado de flanco de superficies complejas, pasando por el fresado de flancos en 5 ejes de superficies esculpidas complejas, para luego analizar la generación de trayectorias de fresado en adecuación con capacidades y comportamiento de equipos de mecanizado y la optimización inteligente del mecanizado de superficies esculpidas de 3 ejes en sistemas CAM existentes. Una vez analizadas se hará una planificación de procesos para fresado de superficies de escenografías basadas en el análisis de accesibilidad de los cortadores.

3. 1. Fresado de flanco de superficies complejas

El fresado de flancos es una operación definida por el uso de una gran profundidad de corte axial con herramientas de fresado de extremo, alta velocidad de corte y profundidades radiales de corte relativamente pequeñas. Este proceso está especialmente recomendado para el mecanizado de superficies regladas, cuyo contacto tangencial del cilindro involucrado con el cuerpo de la herramienta de corte es el factor clave para definir las trayectorias de las herramientas. Debido a la complejidad de este tipo de superficies, se requiere un fresado de 5 ejes, teniendo especial cuidado en las interferencias geométricas entre la herramienta y la geometría compleja de las piezas para evitar colisiones. Finalmente, se presenta un nuevo modelo para la predicción de rugosidad y precisión dimensional en componentes de paredes

delgadas, junto con ejemplos de piezas con superficies que necesitan las operaciones de fresado por flanco debido a su complejidad. [5]

Las ventajas de mecanizado multi-eje se pueden dividir en dos grupos principales. En primer lugar, se pueden hacer referencia a las ventajas industriales [5], que implican la capacidad del proceso de mapeo de cinco ejes para mejorar la productividad y la precisión mediante el uso de ejes adicionales de la máquina. Los dos ejes de orientación adicionales permiten el mecanizado de piezas muy complejas, que no se pueden mecanizar con máquinas de tres ejes. Por ejemplo, en el sector automotriz, todas las caras de las piezas deben mecanizarse, por lo que se evitan diferentes ajustes y configuraciones con una máquina de 5 ejes. Esto mejora tanto la productividad como la precisión al reducir los tiempos de inactividad de configuración y los errores ocurridos entre diferentes configuraciones. Además, se pueden usar herramientas más adecuadas para cada operación a fin de aumentar la productividad simplemente colocando la herramienta y la pieza de trabajo. Finalmente, la longitud de la herramienta es necesariamente grande cuando se mecanizan las cavidades profundas. Por lo tanto, la rigidez de la herramienta es mayor, lo que aumenta la precisión de mecanizado y reduce el riesgo de rotura de la herramienta [5]. Algunas de estas ventajas se muestran en la Fig.28 (superior) mecanizado total de una pieza compleja en un solo accesorio y también el uso de herramientas más cortas y rígidas. Como se muestra en la Fig.28 (inferior) la rigidez de la herramienta está directamente relacionada con el factor L3, por lo que una reducción en la longitud de la herramienta disminuye la falta de precisión debido a este efecto. En los últimos años, durante las ferias EMO y otras exhibiciones nacionales, se exhibieron muchos centros de fresado de 5 ejes en modo de operación A3-2 [5], orientando el eje de la herramienta con respecto a la superficie objetivo y realizando la interpolación de los tres ejes cartesianos. Como ejemplo, en Fig.28 (superior) se presenta una parte poliédrica de prueba; esta pieza de aluminio se fabricó en solo 3 minutos con una placa de fresado de tres insertos. Por otro lado, se pueden destacar algunas ventajas tecnológicas. La orientación de la herramienta se puede usar para aumentar la productividad al cambiar tanto el tipo de herramienta (utilizando una más rígida o más productiva) como la estrategia de mecanizado. Tres ejemplos pueden ser ilustrativos de esto:

- En la operación de acabado de superficies regladas, se puede utilizar la estrategia de fresado de flanco, mecanizando con la parte cilíndrica de la herramienta con una gran profundidad de corte. Esta estrategia puede reducir el tiempo de mecanizado y mejorar la superficie acabada.

- Otro ejemplo es el mecanizado de planos inclinados: utilizando la herramienta con la correcta orientación del eje, la operación de fresado frontal puede llevarse a cabo en lugar de tener que cambiar la herramienta esto hace también que se obtenga una reducción del tiempo de mecanizado y una mejora de la calidad de la superficie.

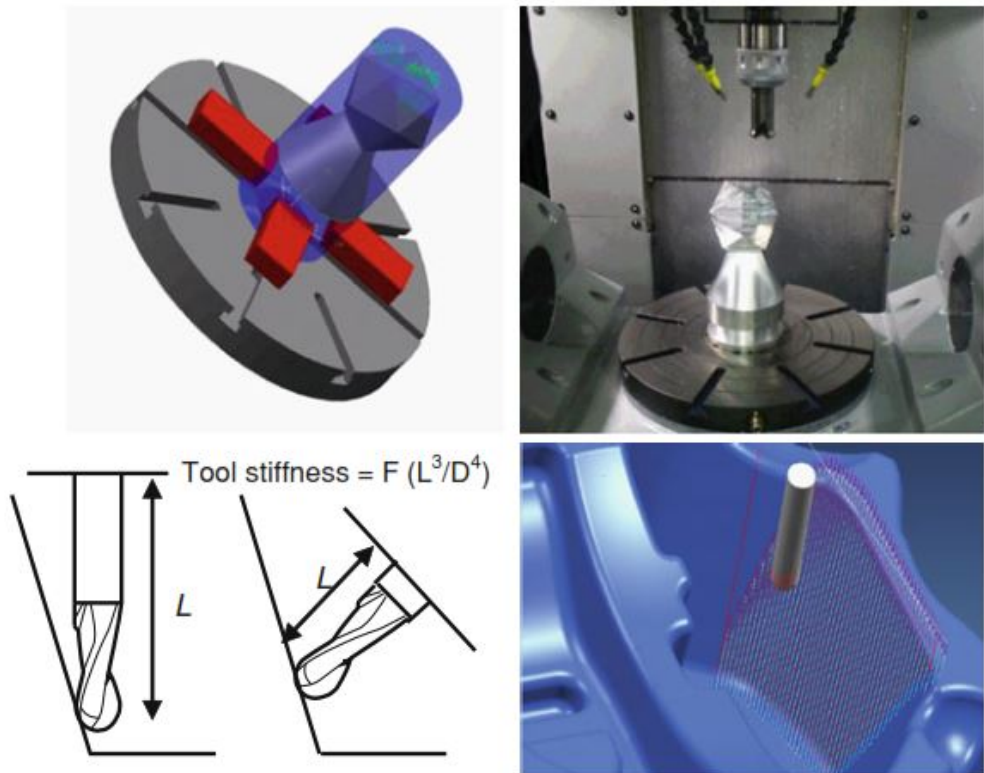


Figura 28. Orientación y rigidez de la herramienta

- El uso de molinos de bolas puede mejorarse sustancialmente modificando ligeramente la orientación del eje de la herramienta. De esta manera, se puede evitar cortar con la punta de la herramienta. Como se muestra en la figura 29 hay un área de velocidad de corte baja en la punta de la herramienta de una fresa esférica, por lo que el proceso de corte es muy desfavorable en este punto. Por lo tanto, utilizando una mejor orientación de la pieza por medio del control numérico, se puede mejorar la velocidad de corte y de todo el proceso. Además, esta capacidad de cambiar la orientación de la herramienta permite el uso de cerámica de alto rendimiento o herramientas PCBN, la principal

dificultad para estas herramientas es la necesidad de una alta velocidad de corte continuo. La falta de continuidad es la razón de los fallos típicos de la punta de la herramienta debido al comportamiento frágil inherente de los materiales cerámicos.

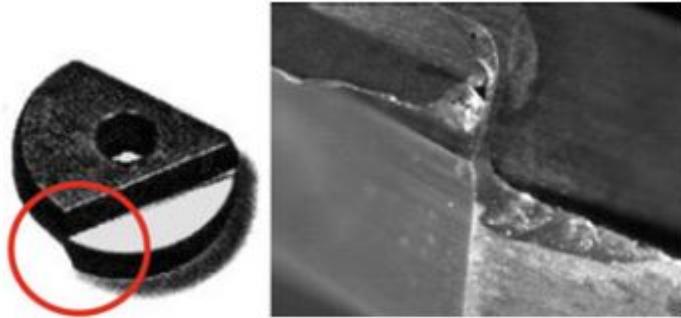


Figura 29. Desgaste de la herramienta

Sin embargo, hay dos problemas principales en el desarrollo del proceso de mecanizado de 5 ejes. Por un lado, los relacionados con la generación CAM y Toolpath, por otro lado, las posibles interferencias durante el proceso, las colisiones de la herramienta contra partes y accesorios e incluso entre diferentes partes de la máquina.

La principal preocupación durante la generación de trayectorias de herramientas aparece en el paso de post-procesamiento, cuando la trayectoria generada por CAM se traduce al código de CNC. Hay muchas configuraciones diferentes de máquinas de cinco ejes, y los post-procesadores deben adaptarse para cada uno de ellos. Por ejemplo, usar una máquina con dos ejes giratorios adicionales en la plataforma es absolutamente diferente de aquellos con dos ángulos de orientación (ángulos de giro e inclinación) en la cabeza de la herramienta. La misma parte e incluso el mismo código APT obtenido de CAM, conduce a códigos CNC muy diferentes. Otro problema real es la posibilidad de colisiones durante el proceso de mecanizado. Las colisiones pueden dañar los rodamientos híbridos del husillo de alta velocidad (carreras de acero con cojinetes de bolas de cerámica), que implican altos costos de reparación y largos tiempos de mantenimiento fuera de producción. Incluso si la máquina no está dañada, el proceso de 5 ejes generalmente se aplica a piezas incompletas y de alto valor añadido, como piezas hechas en titanio y / o espesores, o piezas de fundición de precisión de forma neta; los errores de mecanizado pueden dañar la pieza de trabajo perdiendo mucho tiempo de mecanizado. En este sentido, se puede aplicar un nuevo enfoque a la etapa CAM del proceso completo. La definición de confiabilidad para un

proceso de mecanizado es " lograr una buena productividad con un bajo riesgo de piezas desperdiciadas por estar fuera de tolerancias o con errores irrecuperables ". En la producción de fresado de 5 ejes, CAM y el usuario de CAM son el centro de gravedad del proceso de planificación, porque los trabajadores del taller solo pueden cambiar los valores reales de velocidad de corte y velocidad de avance haciendo uso de los mecanizados (que modifican la alimentación real y la velocidad de rotación del husillo con respecto a los programados en el código NC), siendo imposible cambios de la compleja herramienta directamente en la interfaz CNC. Se presenta un nuevo procedimiento CAM inteligente y se describen algunos ejemplos interesantes. Ese esquema de producción incluye un enfoque de conocimiento real basado en un modelo científico para evaluar la fuerza de corte, que muestra que las nuevas tendencias del proceso de planificación CAM incluyen el conocimiento del proceso obtenido a partir del modelado complejo del proceso de mecanizado.

3. 2. Fresado de flancos en 5 ejes de superficies esculpidas complejas

El fresado de flancos implica el mecanizado de una pieza de trabajo con la parte lateral de la cuchilla. Las generatrices de corte generalmente son líneas rectas (con un cortador cilíndrico o cónico) o arcos de círculos (cortador de barril), pero en algunos casos pueden tomar otras formas. Este proceso es ampliamente utilizado en la industria para todas las operaciones de contorneado. Las piezas así producidas toman la forma de planos, porciones de cilindros o conos y más generalmente cualquier tipo de superficie desarrollable. La ventaja con el fresado de flancos consiste en eliminar una cantidad considerable de material y también permitir acceso a zonas que serían inaccesibles para el fresado final. Este método de fresado se aplica a otros tipos de superficies y es especialmente adecuado para superficies convexas de forma libre o superficies con curvaturas gaussianas negativas, que tienen una de sus principales curvaturas pequeñas en comparación con el radio del cortador, siendo sujeto a un cambio muy leve en toda la superficie. Las superficies gobernadas responden a los criterios previamente establecidos y generalmente se mecanizan de esta manera. Tales superficies se encuentran principalmente en piezas de trabajo que entran en la fabricación de turbomáquinas. Dado su papel crítico y las tensiones a las que están sometidos, estas piezas de alto valor añadido requieren cuidados especiales. No es sorprendente que haya muchos estudios sobre cómo aumentar la productividad respetando los niveles de calidad requeridos por las especificaciones pertinentes. Entre tales piezas de trabajo, se encuentran las siguientes:

- **Impulsores** (Fig. 30): piezas giratorias utilizadas para aspirar un líquido, o para difundir o comprimir un gas. Los impulsores están provistos de matrices de cuchillas principal y secundario. El lado cóncavo y el lado convexo de estas cuchillas son generalmente modelado por superficies gobernadas no desarrollables con giro reducido y bordes posteriores y giro pronunciado ubicados hacia el centro de la hoja. Las alturas de las cuchillas permanecen bastante bajas.



Figura 30. Impulsor

- **Inductores** (Fig. 31): piezas giratorias colocadas a la entrada de un impulsor con el objetivo de mejorar el rendimiento. Trabajan para proporcionar una sobrepresión para que el fluido no forme parte de la bomba principal. Los lados cóncavo y convexo están modelados por superficies gobernadas no desarrolladas cuyo giro es bastante alto y regular.



Figura 31. Inductores

• **Ventiladores** (Fig. 32): piezas giratorias utilizadas para acelerar un fluido. Tienen una gran cantidad de cuchillas cortas y altas. Los lados cóncavos y convexos están modelados por superficies de forma libre sin reglas. La principal ventaja de Flank Milling es aumentar el ancho del área de mecanizado cuando el cortador pasa a través. Esto lleva a tiempos de mecanizado más cortos, menores costos de producción y mayor productividad. Otro resultado positivo en aumentar el ancho de corte radica en reducir las operaciones de pulido. Donde las superficies se pueden modelar en una sola pasada, no se deja material detrás de la cortadora y las operaciones de pulido son, por lo tanto, muy reducidas.

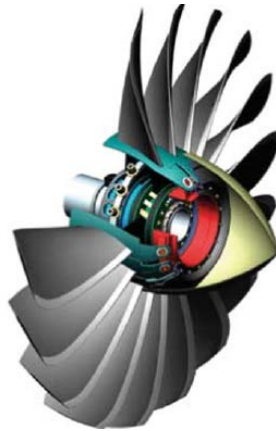


Figura 32. Ventiladores

3. 3. Generación de trayectorias de fresado

El aumento de los costos técnicos y económicos, requisitos asociados con una diversificación del equipo de mecanizado, hace obligatorio implementar estrategias de fresado específicas de la máquina para ser eficiente. Se identifican las principales evoluciones tecnológicas dentro de este contexto. Entonces, métodos avanzados de programación CNC son presentados y discutidos. Basado en conceptos innovadores y una nueva visión del proceso de generación de trayectorias de las herramientas, permite seleccionar la parametrización más adecuada. En particular, la fabricación virtual puede ser de gran interés.

Con la llegada del fresado multi eje de alta velocidad de superficies esculpidas complejas, el mecanizado se ha convertido en una práctica muy común. En paralelo, los requisitos relacionados con productos industriales han aumentado dramáticamente en las últimas décadas especialmente en relación con el mercado de tiempo y la personalización. Para cumplir con esta solicitud, el equipo de fabricación

ahora está segmentado en términos de capacidades. De la misma manera, el uso de estas máquinas herramienta altamente especializadas requiere una específica programación CNC. La generación y control de la trayectoria de la herramienta se ha convertido en un problema central. Es necesario generar trayectorias de herramientas de fresado que estén en adecuación con las capacidades del equipo de mecanizado y su comportamiento para enfrentar los desafíos de la industria manufacturera de hoy. Nuevas trayectorias de herramientas, cuya eficiencia ha aumentado drásticamente aumentado con avances tecnológicos, se introducen también. Es necesario para identificar las características de los modernos equipos multi-ejes para proponer parametrizaciones eficientes de ruta de herramienta. Enfocar el mecanizado en la simulación es muy útil para probar varias configuraciones y calcular parametrizaciones óptimas a bajo coste.

El mecanizado de superficies complejas con frecuencia requiere estrategias de fresado de 5 ejes. En comparación con el mecanizado clásico de 3 ejes, los dos grados adicionales de la libertad proporcionados por los ejes giratorios complican el procedimiento. Gran parte de la investigación se focaliza en definir la mejor posición y orientación de la herramienta. La mayoría de las dificultades asociadas con la fabricación de múltiples ejes se concentran en el cálculo de estrategias. Las diferentes orientaciones de una herramienta permiten mecanizar una gran variedad de formas independientemente de la forma de la herramienta: se pueden usar diferentes geometrías de corte para cortar la misma geometría. La razón para esto es que el llamado punto de contacto del cortador (CC) puede moverse a lo largo del borde cortante de la herramienta según la orientación de la misma. Hay dos parámetros importantes que definen la orientación de una herramienta. El ángulo de avance es un ángulo medido en el plano que contiene el vector local tangente al recorrido de la herramienta y el vector local normal a la superficie que se está mecanizando. El ángulo del título se define como en el plano con el local vector tangente a la trayectoria de la herramienta como es normal. La mayoría de los problemas actuales y los trabajos de investigación relacionados están asociados con las estrategias de mecanizado de 5 ejes. Existen básicamente, dos tipos de fresas de 5 ejes: fresado de extremo y fresado de flanco, dependiendo de si su extremo o flanco del cortador se usa para el mecanizado. Ambos tipos tienen sus propios campos de aplicación preferidos. Sin embargo, se han hecho más esfuerzos de investigación en el fresado de acabado de superficies porque ofrece más aplicaciones industriales.

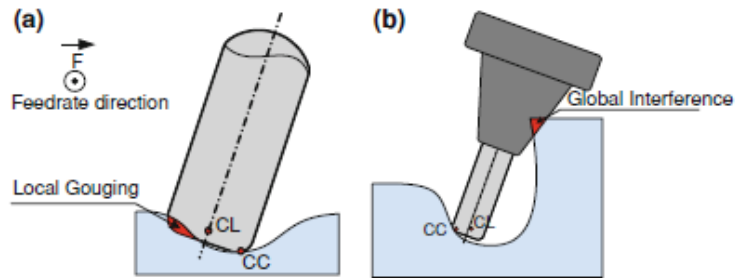


Figura 33. Colisiones posibles durante el mecanizado

Tres problemas principales están asociados con las trayectorias de la herramienta de fresado de extremo: el posicionamiento de la herramienta de corte, la orientación de la herramienta y la generación de trayectoria de herramienta.

El posicionamiento de la herramienta significa definir la posición exacta de CC. El problema principal es que evite las ranuras locales. Este fenómeno aparece cuando una porción del borde de corte de la cuchilla se extiende por debajo de la superficie más allá de la tolerancia de superficie permisible y crea una zona de corte (Fig. 33 a).

Se han propuesto varios métodos de posicionamiento de herramientas. La computación es llevada a cabo ya sea directamente o en dos etapas, colocando la herramienta en las proximidades de posición antes de ajustarlo para evitar errores.

El segundo problema es definir **la orientación de la herramienta**. La mayor parte del trabajo está relacionado con la prevención global de colisiones. De hecho, evitar interferencia global es uno de los problemas clave en la generación de trayectorias de herramienta de 5 ejes (figura 33 b). En la práctica, la mayoría de los métodos propuestos se basan en prueba y error para encontrar las interferencias de colisión y generalmente lleva mucho tiempo determinar una solución final.

Algunos enfoques desarrollados recientemente tienen en cuenta la cinemática y aspectos dinámicos del proceso y la máquina herramienta para establecer la orientación de la herramienta de corte [5].

Un enfoque original y eficiente fue propuesto por Hascoet. [5] El propósito es calcular la prevención de colisiones en el espacio de trabajo articular de la máquina herramienta. Otro método que introdujo es el concepto de "Superficie de mecanizado", definido como un modelo de superficie para la generación de trayectorias de herramientas. Se consideran dos superficies: la superficie de guía, que garantiza el posicionamiento de la herramienta independientemente de la estrategia de fresado

seleccionada, y la superficie de orientación, que controla la orientación de la herramienta (Fig. 34). A partir de esta superficie, se pueden implementar métodos basados en propiedades topológicas y cinemáticas [5].

El último problema es **la generación de la trayectoria de la herramienta**, lo que significa la determinación de seis parámetros para cada posición controlable de la cortadora, tres parámetros de ubicación de la cuchilla y tres parámetros de orientación del cortador. Con los años, varias generaciones de caminos de herramientas técnicas han sido propuestas. El enfoque iso-paramétrico ha sido el método comúnmente más empleado [5], gracias a la sencillez y simple computación asociada. La calidad óptima de la superficie mecanizada no se puede lograr con precisión.

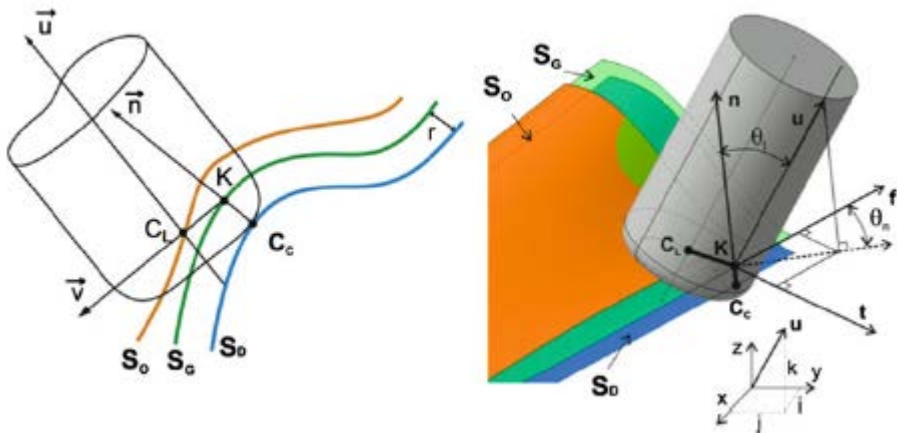


Figura 34. El concepto de superficie de mecanizado



Figura 35. Ejemplo de trayectoria de fresado de flanco

Las operaciones de fresado de flanco se emplean generalmente para mecanizar superficies con reglas, y la herramienta de corte sigue la regla de superficie del modelo CAD. La orientación de la herramienta afecta en gran medida la precisión de la pieza a medida que el flanco del cortador genera la superficie mecanizada. Las estrategias de fresado de flanco se emplean ampliamente para el mecanizado de superficies esculpidas complejas tales como impulsores y álabes de turbinas [5].

Las tasas de eliminación son mayores en comparación con las estrategias de fresado de extremo, pero varias restricciones se asocian con estas trayectorias de herramienta. Si la superficie CAD es una superficie gobernada desarrollable, la cortadora puede colocarse tangente a ella sobre la regla completa y no hay un problema importante. Si la superficie CAD no es desarrollable, el proceso de fresado a menudo genera errores de desviación. Por lo tanto, la definición de una ruta de acceso de herramientas que minimice estos errores se convierte en un problema central. La mayoría de los enfoques de generación de trayectoria de la herramienta de fresado de flanco dependen de un primer posicionamiento de herramienta en puntos de contacto determinados seguidos de optimizaciones para reducir los errores geométricos.

La suavidad del camino de la herramienta también es esencial. Los métodos cinemáticos que se han introducido tienen, por un lado, el concepto de Dominio de Orientación Admisible, que define una orientación de herramienta que cumpla con los requisitos tanto cinemáticos como funcionales empleados; y por otro lado, un enfoque basado en la minimización de la energía aplicada al concepto de superficie de

mecanizado que equilibra la suavidad de la trayectoria de la herramienta contra las desviaciones geométricas para controlar las fuerzas de corte a lo largo de la trayectoria de la herramienta. Otra dirección de optimización es centrarse en el perfil de la herramienta en lugar de en la ruta que la herramienta forma mediante el empleo de cortadores de medio barril.

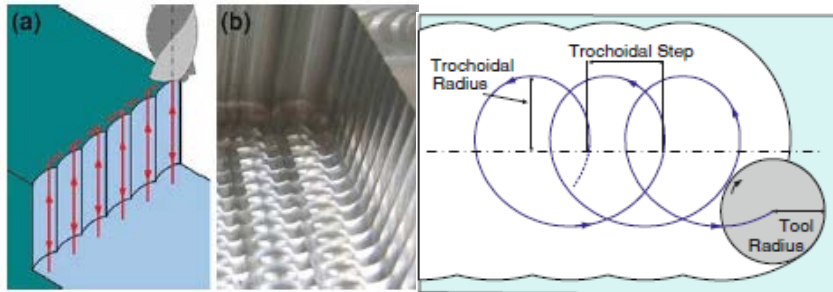


Figura 36. Trayectorias de fresado por inmersión: **a** ejemplo de tool-path, **b** superficies mecanizadas. Trayectoria trocoidal

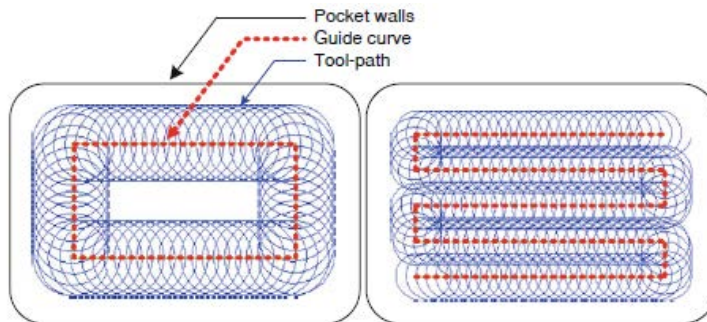


Figura 37. Ejemplo de curvas de guía para fresado de bolsillo trocoidal

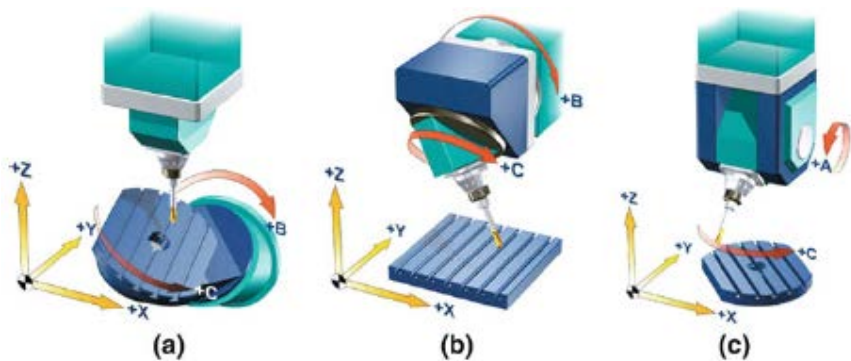


Figura 38. Ejemplo de orientación de los ejes de una máquina herramienta

Hay tres etapas en la generación de trayectorias de corte CAM, de acuerdo con el tipo de operación: **desbaste** (a), **semiacabado** (b) y **acabado** (c).

El proceso de desbaste (a) es de importancia crítica en HSM. El semi-acabado (b) está destinado principalmente a eliminar el material irregular y mantener un margen uniforme para las operaciones de acabado posteriores. El objeto en el acabado (c) es lograr una rugosidad y tolerancia especificadas por el cliente para cada superficie. La estrategia tradicional es el zigzag, pero en este caso el principal inconveniente es que intercala dos tipos de corte diferentes, el fresado descendente (también llamado fresado de ascenso) y el fresado ascendente. Una solución puede ser cortar en una dirección (zig), ya sea downmilling (la más utilizada) o upmilling, pero no a lo largo ambos. La mejor opción es el uso de estrategias de fresado más adaptadas a cada una de las zonas de piezas y su geometría, dependiendo de factores como el control del impacto y, como consecuencia, la máxima rugosidad R_t , variando la profundidad radial de corte de acuerdo con la pendiente de la pieza. En la definición de parámetros de corte, dos utilidades desarrolladas (g, h) están nuevamente disponibles para ayudar en la selección de trayectorias y condiciones de corte.

Se incluye una etapa de verificación (d) para los programas NC, utilizando un software ad hoc como Vericut, NC-Verify, NC-Simul. Estos softwares permiten una simulación virtual previa al mecanizado real, en la que diferentes problemas pueden ser detectados de manera efectiva, como colisiones, mecanizado fuera del área de trabajo de la máquina y problemas debido a la medición de herramientas en la pieza de trabajo. La simulación virtual es un paso fundamental en la generación de trayectorias de herramientas de mecanizado multi-eje. El software del simulador permite al usuario realizar una simulación virtual del proceso anterior al mecanizado real; diferentes problemas pueden ser detectados y corregidos de manera efectiva:

- Colisiones e interferencias entre la herramienta y la pieza, portaherramientas y parte, o incluso entre la cabeza del husillo y la plataforma de la máquina
- Mecanizado fuera del volumen de trabajo de la máquina
- Problemas debido a la medición de la herramienta en la pieza de trabajo. Este es un aspecto importante en el mecanizado de esquinas.

Sin embargo, el resultado está muy lejos de obtener una trayectoria de herramienta verdaderamente confiable. La simulación virtual solo tiene en cuenta las colisiones geométricas, por lo que los problemas debidos al proceso de corte en sí no se revelan. La simulación virtual garantiza que no habrá colisiones durante el mecanizado, pero

no significa que será un mecanizado sin inconvenientes. A pesar de sus limitaciones, la simulación virtual es una herramienta poderosa para lograr un buen proceso de mecanizado, que permite una detección muy rápida de los espejos durante el proceso de mecanizado. Como conclusión, en tres ejes se recomienda la simulación virtual, pero en cinco ejes es esencial. En la actualidad, debido a la información útil proporcionada por los sistemas de verificación, la tendencia es introducir la simulación virtual en el software CAM o incluir un enlace directo a otro software de socios.

3. 4. Estrategias de mecanizado

En los últimos años, industrias como la aeroespacial, la construcción naval, la automotriz e incluso la carpintería de madera han visto un uso cada vez mayor de superficies esculpidas para satisfacer necesidades funcionales o estéticas. Para llegar a la producción de superficies cada vez más complejas y con tiempos de producción rentables, se empezaron a desarrollar estrategias de mecanizado útiles para elegir trayectorias, herramientas y procesos óptimos para mecanizar cada pieza. [9]

Hay muchos factores a considerar a la hora de elegir una trayectoria u otra, por ejemplo:

1. Dependiendo de la geometría de la pieza, el diseñador tendrá que elegir la mejor trayectoria que permita ahorrar tiempo de mecanizado y no dañe la herramienta.
2. También la elección de las herramientas es muy importante. Dependiendo de éstas, podremos aplicar mayores números de pasadas, y las trayectorias serán más amplias o más estrechas.
3. A la hora de escoger una trayectoria el tipo de máquina empleado es de fundamental importancia, no es lo mismo trabajar con 5 ejes en que con 3 ejes, dependiendo del tipo de máquina, podremos operar de manera más precisa o más lenta.
4. Otro aspecto a tener en cuenta es el tipo de mecanizado que queramos realizar.
 1. **Desbaste:** El primer paso cuando se mecaniza una pieza, es una operación rápida y de muy baja precisión para eliminar el material sobrante.
 2. **Acabado:** Una vez obtenida la geometría de la pieza, se suele terminar con esta operación de muy alta precisión dejando la pieza con su aspecto final.
 3. **Refinado:** Con un ritmo de ejecución muy lento, esta última operación se realiza con herramientas de pequeño tamaño. [9]

Los programas de CAD/CAM hoy en día te dejan escoger entre varias tipologías de trayectorias, entre todas las más comunes son:

1. **Generación automática de trayectorias:** muchos softwares dejan la opción de calcular la trayectoria en automático según la geometría de la pieza y los parámetros del software. No es muy recomendable porque no se consideran los aspectos analizados anteriormente.
2. **Generación manual de trayectorias:** requiere amplios conocimientos, tanto del mecanizado como de la máquina utilizada. Esta tipología de trayectoria suele ser utilizada por usuarios expertos y con muchos años de experiencia.
3. **Generación semiautomática de trayectorias:** Método empleado por los usuarios intermedios que especifican una serie de parámetros de máquina para intentar lograr un buen resultado.

Las tipologías de trayectorias existentes son numerosas.

A continuación, analizaremos algunas:

1. Dependiendo de la profundidad a mecanizar hay que especificar en qué modo la herramienta se acerca a la pieza:
 1. **Mecanizado manteniendo altura constante utilizado en el desbaste,** se divide la altura del material a eliminar y se elige cuantas pasadas tiene que hacer la herramienta para mantener un espesor constante.
 2. **Mecanizado manteniendo la orientación de la herramienta fija, pero variando la altura,** en esta trayectoria se adapta la altura de la herramienta a la superficie de la pieza sin variar el ángulo del eje de rotación de la herramienta.
 3. **Mecanizado variando la altura y la orientación,** con el objetivo de tener la herramienta siempre perpendicular a la superficie de la pieza. En este tipo de trayectoria varía la altura la orientación de la herramienta. Utilizada en máquinas muy potentes y de 5 ejes para obtener un mecanizado de óptima calidad.



Figura 39. Elección de diferentes trayectorias de mecanizado

2. Hay que especificar como se acerca la herramienta a la pieza según la disposición de la trayectoria.
 1. **Zigzag:** Recomendada para los desbastes con altura constante, la herramienta recorre una trayectoria de planos paralelos y perpendiculares al material. Cada vez que la herramienta ataque un nuevo plano esto la obliga a realizar un cambio de sentido a zigzag.
 2. **Espiral:** La herramienta va realizando una trayectoria concéntrica que la acerca al centro de la pieza pasando por los contornos. Operación recomendada para desbaste.
 3. **Radial:** Recomendada para el mecanizado en altura variable. En esta estrategia, la herramienta parte desde el centro y va realizando trayectorias circulares hasta el exterior.
 4. **Contorneado:** Recomendada para los perfilados. En esta trayectoria la herramienta sigue el perfil de la pieza.
 5. **Ortogonal:** Utilizada en perfilado de objetos, la herramienta se desplaza perpendicularmente.
 6. **Iso - paramétrico:** Recomendada para mecanizado superficial, la herramienta se desplaza sobre líneas iso-paramétricas situadas sobre la superficie. [9]

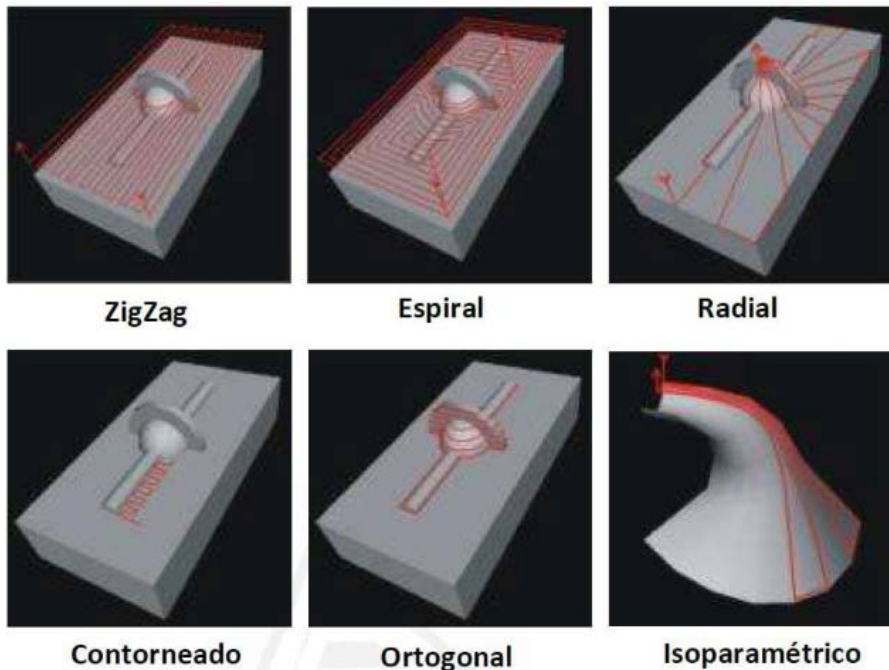


Figura 40. Tipologías de trayectorias y acercamientos a la pieza

Una vez elegida la estrategia para nuestro mecanizado, tenemos que elegir qué trayectoria será óptima para mecanizar nuestra pieza. Aunque se elija la mejor estrategia, hay muchos problemas que pueden surgir a la hora de mecanizar. Entre todos ellos, uno de los más comunes es la falta de precisión, que se puede controlar con:

1. **Distancia ente puntos sucesivos:** Muchas veces las piezas presentan imperfecciones que en el CNC se traducen como errores entre dos puntos sucesivos.
2. **Distancia entre pasadas:** Si hay mucha distancia entre pasadas pueden producirse valles, pero si la distancia es muy pequeña, esto aumenta el tiempo de trabajo aumentando los costes.
3. **Elección de herramientas incorrectas:** Cuando el radio de la herramienta es mayor que la inversa de la curvatura de la superficie dando lugar a mecanizados no óptimos.
4. **Problema de planificación de trayectorias:** Para reducir al máximo el tiempo de mecanizado y para evitar errores hay que planificar el orden de las trayectorias. [9]

Capítulo 4 PLAN DE PROCESOS DE MECANIZADO

Para planificar la producción de una pieza es conveniente seguir un determinado proceso. En este capítulo se expondrá el procedimiento elegido para llegar a la producción de la pieza objeto del estudio de mecanizado de superficies complejas.

- 1- La primera fase de este proceso consiste en la elección de la pieza con sus características principales cual la geometría, el material con lo cual se producirá, la cantidad de piezas a producir, etc.
- 2- La segunda fase se centra en el estudio de la máquina herramienta, sus características técnicas y las limitaciones que esta impone a la hora de mecanizar.
- 3- Una vez se tenga claro el material y la geometría de la pieza junto con las características de la maquina se pasa a la fase de la elección de las herramientas y plaquetas para este proceso.
- 4- El paso sucesivo es saber cómo aplicar y utilizar estas herramientas se harán los cálculos de corte para poder impostar la máquina herramienta.
- 5- Se concluye el proceso con la análisis y resolución de los problemas.

En la figura sucesiva se muestra el proceso que se va a seguir para llegar a la creación de una pieza de superficies complejas mediante el mecanizado de sus superficies.

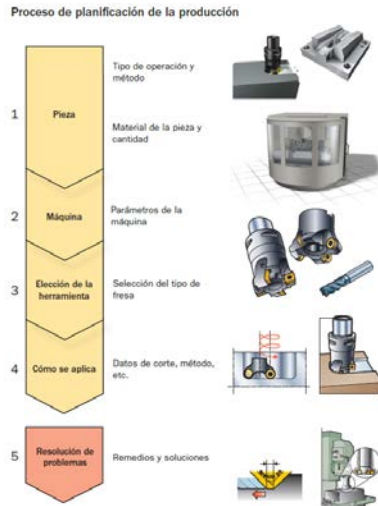


Figura 41. Proceso de fabricación

A continuación, se detallarán cada una de las 5 fases de este proceso.

4.1.1. Pieza

Con el fin de estudiar una estrategia de mecanizado de superficie complejas se ha diseñado una pieza que presente diferentes superficies donde la máquina herramienta pueda actuar con más pasadas para lograr obtener las superficies objeto del estudio de este trabajo.

Lo más importante a tener en cuenta a la hora de elegir la pieza es:

Forma geométrica

- Superficies planas
- Cavidades
- Paredes delgadas
- Ranuras

Tolerancias

- Acabado superficial
- Integridad superficial
- Precisión de dimensiones

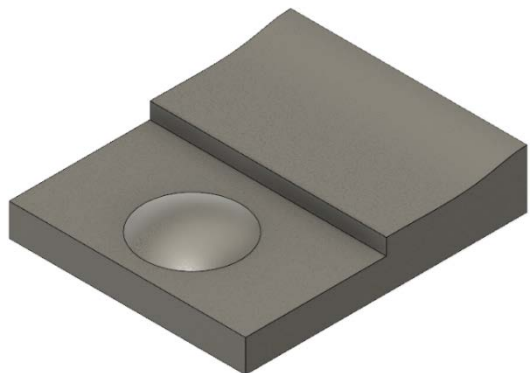


Figura 42. Geometría pieza elegida para el estudio

Material

- Maquinabilidad
- Formación de la viruta
- Dureza
- Aleaciones

4. 1.2. Material Toolox 44

Para la creación de esta pieza se ha elegido el Toolox 44 un acero endurecido utilizado para herramientas e ingeniería, a pesar de su dureza, combina una buena mecanización con alta estabilidad dimensional durante el mecanizado. Su dureza nominal 450 HBW/45 HRC convierte a Toolox 44 en la opción ideal para aplicaciones complejas de moldes y matrices. La gran limpieza del acero proporciona a Toolox 44 muy buenas propiedades de pulido, brillo y texturizado.

Propiedades mecánicas según normas EN ISO 6506-1 EN 10 025, EN ISO 148.

Espesor (mm)	Dureza (HBW)
6-130	410-475
Temperatura de ensayo	Energía de impacto
20º	18min J

Tabla.4 Propiedades Toolox 44.

En las aplicaciones que requieren más dureza superficial para resistir el desgaste, se puede nitrurar y revestir con PVD el Toolox 44 para personalizar las propiedades del molde o matriz. Se pueden llevar a cabo procesos de ingeniería de superficies, siempre que la temperatura de deposición no supere los 590 °C. [10]

El acero Toolox tiene una buena maquinabilidad, y tiene propiedades ESR. Con este acero para herramientas pre-endurecido moderno, se elimina la necesidad de reducir las tensiones, así como realizar el tratamiento térmico durante la fabricación. De este modo se pueden reducir los plazos de fabricación de las herramientas. Toolox posee las propiedades de un acero refundido con lecho electro conductor (ElectroSlag Remelted), y por tanto presenta una gran homogeneidad y limpieza. Su bajo contenido de aleación también facilita en gran medida los cortes y soldaduras térmicos en comparación con el acero para herramientas tradicional con una dureza equivalente. [10]. El Toolox 44 es un nuevo acero que se suministra templado y revenido. A pesar

de su dureza, que asciende a 45 HRC, el Toolox 44 es fácil de mecanizar, posee alta resistencia a temperaturas elevadas y es apropiado para estampas y herramientas de moldeado de plástico y goma, y para colada por presión, así como para herramientas de doblar y conformar chapa. Asimismo, es muy apto para componentes de máquinas, como piezas sometidas a desgaste, raíles de guía, aplicaciones de alta temperatura.

Recomendaciones de fresado

Este material pertenece a la categoría P en la escala de Work material y precisamente al grupo Pre-hardened Steel presentando una dureza de 45HRC.

Work Material		Work Material	Properties
P	Mild Steels		
	Carbon Steels Alloy Steels, Alloy Tool Steels		
	Pre-hardened Steels		
M	Stainless Steels	Carbon Steels Alloy Steels	180–280HB
K	Gray Cast Irons		
N	Ductile Cast Irons	Tool Alloy Steels	≤350HB (Annealing)
	Aluminum Alloys		
S	Titanium Alloys	Pre-hardened Steels	35–45HRC
	Heat Resistant Alloys		

Figura 43. Categoría metales

Toolox tiene un nivel de tensiones residuales muy bajo. Para obtener un efecto integral, se tiene que utilizar dispositivos de sujeción que no estén deformados. Si las piezas en bruto son oxocortadas, Se aconseja fresar entre 5 y 10 mm respecto del borde oxocortado para conseguir una pieza en bruto sin tensiones residuales. [12]

Se ha mejorado la maquinabilidad de este material así que, el calor generado durante el fresado se transfiere a la viruta y no al filo de corte o a la pieza. [12]

Consejos para el fresado

- 1- Para conseguir una viruta más gruesa a la entrada y más fina a la salida es preferible colocar el plato de la fresa excéntricamente a la izquierda de la pieza.
- 2- Al fin de no generar vibraciones es preferible evitar realizar el corte a través de la línea central de la fresa.

- 3- El fresado descendente es el mejor y el que da mejores acabados y menores vibraciones.
- 4- Es recomendable que el empañe radial de la fresa sea o correspondiente al 25% o correspondiente al 75-80% del diámetro de la fresa. [12]



Figura 44. Fresa plana

- 5- El material de la plaqueta para trabajar este material es metal duro cementado ISO clase P20 o P30.
 - 6- Asegurarse de utilizar siempre un Angulo de corte positivo.
 - 7- Velocidad recomendada $V_c = 100-150$ m/min.
 - 8- Avance recomendado $f = 0.10-0.15$ mm/diente.
 - 9- La mejor opción para el desbaste es utilizar platos con plaquetas circulares.
 - 10- Para el acabado es conveniente utilizar fresas con ángulo de posición de 45° .
- [13]

4. 1.3. Máquina Gentiger GT-66V

La máquina empleada para el proceso de mecanizado juega un papel fundamental, porque debido a ésta, las simulaciones tendrán que hacerse respetando las limitaciones de movimiento de la mesa de trabajo y de la herramienta, además impondrá sus limitaciones en tema de potencia de máquina y de velocidad de rotación del husillo.



Figura 45. Centro de mecanizado GT-66V

Para este trabajo, la máquina empleada es una Gentiger GT-66V caracterizada por una cinemática de 3 ejes más uno añadido posteriormente, los cuales permiten mecanizar superficies complejas y pequeños moldes. Alta velocidad de giro y alta precisión son las características principales de esta máquina. El GT-66V presenta una estructura de doble columna de alta velocidad que permite a la máquina exhibir completamente su extraordinaria estabilidad y rigidez durante el mecanizado de alta velocidad. El mecanizado tiene un recorrido X, Y, Z de 720x500x400mm. Las velocidades de corte en tres ejes son 20 m /mm. Tres ejes están montados con guías lineales tipo rodillo para mejorar la estabilidad del viaje.



Figura 46. Estructura y dimensiones de trabajo GT-66V

Analizando la máquina, la mesa de trabajo desarrolla el movimiento a lo largo del eje X e Y, mientras el movimiento a lo largo del eje Z es desarrollado por el cabezal donde se encuentra el husillo vertical. La información relativa a los movimientos de la máquina es de fundamental importancia para la generación del post-procesadores y análisis del código.

A continuación, se muestra la hoja de datos de esta máquina de alto rendimiento. Se puede notar que a segunda del husillo que monta tiene tres tipologías de configuración T15, S24, S36. Para este estudio se ha utilizado un husillo BT40 así que se impondrá la maquina en la modalidad T15 con una velocidad máxima de rotación de 15000rpm y una potencia absorbida por la máquina de 40kW.

MODEL	T15	S24	S36
Max. spindle speeds	15,000 rpm	24,000 rpm	36,000 rpm
Spindle taper	BT-40/BBT-40	HSK-A63	HSK-E50
Spindle motor	11 kw	30/39 kw	20/24 kw
Inner Dia. of spindle bearing	Ø70 mm	Ø65 mm	Ø50 mm
Bearing lubrication	Grease / Oil-air (opt.)	Oil-Air	Oil-Air
Spindle cooling	Oil-cooling	Water-cooling	Water-cooling
Distance from spindle center to machine front	750 mm		
Table area	750 x 500 mm		
T-slot	18 x 5 x 100 mm		
Height of table from ground	800 mm		
Max. load of table (Average load)	400 kg		
Travel for X, Y, Z-axes	720 x 500 x 400mm		
Distance from table surface to spindle nose	150~550 mm		
Rapid feedrate	30 m/min		
Cutting feedrate	20 m/min		
Magazine capacity	16		
Max. tool length	250 mm		
Max. tool weight	5 kg		
Motor of tool magazine	60 W		
Max. Tool diameter	Ø80 mm		
X, Y & Z axis servomotors	X: 6.3 kw / Y: 5 kw / Z: 5kw		
Air pressure requirement	7 kgf/cm ²		
Air conditioner	750 / 550 W		
Spindle cooler	1950 W	2650 W	2650 W
Automatic lubricator (Slideways)	150 W		
Coolant motor	750 W		
Total power consumption (Max.)	40 KVA	45 KVA	45 KVA
Coolant tank	250 liter		
Packing dimensions (L x W x H)	3200 x 2140 x 2550 mm / 870 x 700 x 1560 mm		

Tabla.3 Ficha técnica GENTIGER GT-66V.

La máquina posee un controlador Sinumerik 840D, del fabricante Siemens que emplea su propio lenguaje conversacional y en el cual se irá almacenando el código G generado por el programa de simulación de mecanizado para poder modelar la pieza.

4.1.4. Herramientas


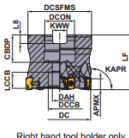
Una vez definido el material, la geometría y estudiadas las características de la máquina herramienta con la cual se irá a mecanizar la pieza objeto de este trabajo falta escoger y definir las herramientas que se van a utilizar, a tal fin se ha creado una base de datos con las herramientas de la marca Mitsubishi teniendo en cuenta tanto las dimensiones, como las características de trabajo de cada herramienta. A continuación, se expondrá una tabla de las herramientas utilizadas para este estudio juntas con sus características generales.

HERRAMIENTA									PLAQUITA	
CÓDIGO	DIÁMETRO	FILOS	LONGITUD	D tornillo	Peso	prof Corte		Max Rev	Plaquetas	Plaquetas Montada
	DC	No.T	LF	DCON	WT	APMX	RMPX	Max spindle		
		mm	mm	mm	kg	mm				
VPX300-063A06AR	63	6	40	22	0,61	11	0,60°	13.400	LOGU12	LOGU1207080PNER-M
MSMHVD0800E	8	4	60	8		19		6000		
SRFH10S12M	10	1	110	12		13		6369	SRBT10	


Tabla.3 Herramientas escogidas para este estudio.

Se expondrán a continuación los datasheet de las tres fresas utilizadas para este trabajo juntas con las velocidades y profundidad de corte de cada fresa

- **Fresa de planear VPX300-063A06AR**, esta fresa se utiliza para preparar la superficie de la pieza saneando las imperfecciones y dejando una superficie limpia y referenciada para poder seguir con el proceso de mecanizado. Se suele quitar con esta fresa el material sobrante en nuestro caso quitará 2 mm de material.

Right hand tool holder only.

DC	Set Bolt	Geometry
φ40	HSC06025H	
φ50, φ63	HSC10030H	
φ80	HSC12035H	

Arbor Type GAMP: -6° T: +5°
 With Coolant Hole GAMB: -22.5° I: +5°

DC=mm size, DCON=mm size, DCDB=inch size

DC	Order Number	Stock	No.T		LF	DCON	WT (kg)	APMX	RMPX	Max. Spindle Speed (min ⁻¹)	Insert Type
			R								
40	VPX300-040A03AR	●	3	40	16	0.21	11	1.06°	17900	LOGU12	
40	VPX300-040A04AR	●	4	40	16	0.21	11	1.06°	17900	LOGU12	
50	VPX300-050A04AR	●	4	40	22	0.34	11	0.79°	15500	LOGU12	
50	VPX300-050A06AR	●	6	40	22	0.33	11	0.79°	15500	LOGU12	
63	VPX300-063A06AR	●	6	40	22	0.61	11	0.60°	13400	LOGU12	
63	VPX300-063A08AR	●	8	40	22	0.62	11	0.60°	13400	LOGU12	

Figura 47. Fresa de planeado

VPX300

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

CUTTING SPEED/ WET CUTTING

Work Material	Properties	Cutting Conditions	Insert		ae			
			Grade	Chip Breaker	<0.25 DC	0.25-0.5 DC	0.5-0.75 DC	1.0 DC
					Vc (m/min)			
Mild Steel	<180HB	● ●	MP6120	M	140 (100-190)	130 (90-180)	100 (70-120)	100 (70-120)
		● ●	VP15TF	M	140 (100-190)	130 (90-180)	100 (70-120)	100 (70-120)
		● ● *	MP6130	M	140 (100-190)	130 (90-180)	100 (70-120)	100 (70-120)
Carbon Steel Alloy Steel Alloy Tool Steel	180-350HB <350HB	● ●	MP6120	M	120 (90-140)	110 (80-130)	100 (70-120)	100 (70-120)
		● ●	VP15TF	M	120 (90-140)	110 (80-130)	100 (70-120)	100 (70-120)
		● ● *	MP6130	M	120 (90-140)	110 (80-130)	100 (70-120)	100 (70-120)
Pre-hardened Steel	35-45HRC	● ●	MP6120	M	100 (80-120)	90 (70-110)	80 (60-100)	80 (60-100)
		● ●	VP15TF	M	100 (80-120)	90 (70-110)	80 (60-100)	80 (60-100)
		● ● *	MP6130	M	100 (80-120)	90 (70-110)	80 (60-100)	80 (60-100)

Figura 48. Velocidad de corte aconsejada para el fabricante de la fresa

DEPTH OF CUT / FEED PER TOOTH

Work Material	Properties	ae	Cutting Conditions	DC			
				Ø25		Ø28-Ø80	
				ap	fz (mm/t.)	ap	fz (mm/t.)
Mild Steel	<180HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.2	<11	0.1-0.3
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.08-0.12	<8	0.1-0.2
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.15
Carbon Steel Alloy Steel Alloy Tool Steel	180-280HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.2	<11	0.1-0.3
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.08-0.12	<8	0.1-0.2
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.15
Carbon Steel Alloy Steel Alloy Tool Steel	280-350HB <350HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12
Pre-hardened Steel	35-45HRC	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12

Figura 49. Profundidad de corte aconsejada para el fabricante de la fresa

- **Fresa plana MSMHVD0800E**, esta fresa entera se utiliza para desbastar quitando material y dejando la pieza con la geometría casi terminada a falta del acabado superficial.

MSMHVD0800E

Product Information



Diameter (Unit)	
Stock	●
Unit of Length	M
DC	8
DCON	8
LF	60
APMX	19
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	4
Max. Cutting Edge Diameter Tolerance	0
Min. Cutting Edge Diameter Tolerance	-0.02
Coated	MS

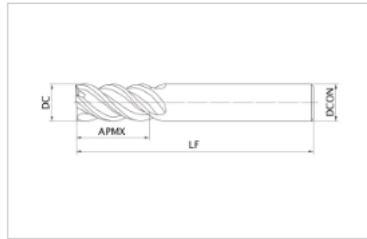
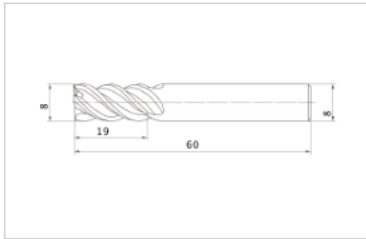


Figura 50. Fresa de plana 8mm

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

Shoulder milling

Work material C45, GG25	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (~30HRC)		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (~45HRC)		Stainless steel (~1100N/mm ²)	
	Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)
6	9000	2240	8000	2240	5300	1060
8	7000	1680	6000	1680	4000	960
10	5000	1440	4800	1440	3200	770
12	4000	1200	4000	1200	2700	760
16	3000	1140	3000	1140	2000	560
20	2400	860	2400	860	1600	510

Depth of cut	D Dia.	

Slot milling

Work material C45, GG25	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (~30HRC)		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (~45HRC)		Stainless steel (~1100N/mm ²)	
	Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)
6	6500	1280	4000	740	3700	440
8	5000	1150	3000	670	2800	340
10	4000	910	2500	530	2200	350
12	3500	900	2000	530	1900	300
16	2500	670	1500	390	1400	260
20	2000	610	1200	350	1100	260

Depth of cut	D Dia.	

Figura 51. Velocidad de corte aconsejada por el fabricante

- **Fresa esférica SRFH10S12M**, se utiliza esta fresa para el acabado superficial quitando con ésta el material dejado por el proceso de desbaste. Las fresas de punta esférica se utilizan para el acabado porque dejan una superficie fina y con buenas tolerancias superficiales.

SRFH10S12M

Product Information

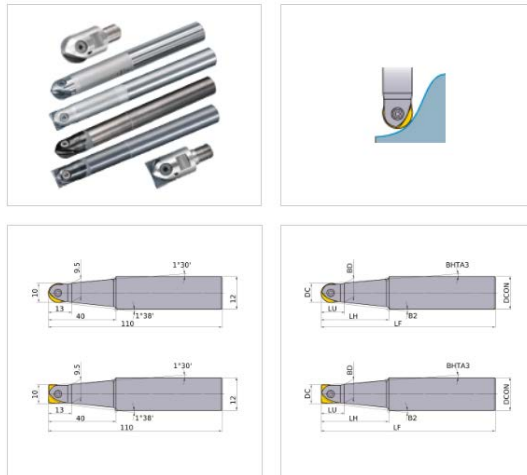


Figura 52. Fresa esférica

Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	10
DCON	12
BD	9.5
B2	1°38'
BHTA3	1°30'
LF	110
LH	40
LU	13
Cutting item count: CICT	1
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	2

Figura 53. Características dimensionales fresa esférica

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS					
Work Material	Hardness	Grade	Cutting Speed v_c (m/min)	Feed per Tooth f_z (mm/tooth)	Depth of Cut a_p (mm)
P	Carbon Steel Alloy Steel	EP6120 VP15TF	200 (80–300)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Pre-Hardened Steel	EP6120 VP15TF	150 (80–200)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Alloy Tool Steel	EP6120 VP15TF	150 (80–200)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
K	Gray Cast Iron	MP8010	250 (180–450)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Ductile Cast Iron	MP8010	200 (80–300)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
H	Hardened Steel	MP8010	100 (60–120)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Hardened Steel	MP8010	80 (60–120)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.01D_1$

Figura 54. Velocidad y profundidad de corte aconsejada.

4.1.5. Teoría de fresado

En este apartado se van a definir algunos aspectos teóricos muy importantes a la hora plantear un proceso de mecanizado, definimos las principales dimensiones, velocidades y profundidades de corte para luego sacar los cálculos de corte de mecanizado

- 1- velocidad del husillo:** Viene representada con la letra n y representa el número de revoluciones por minuto (rpm) que realiza la herramienta en cada minuto.
- 2- Velocidad de corte:** Indicada con la letra V_c representa la velocidad lineal a la que la herramienta mecaniza la pieza se mide en (m/min).
- 3- Diámetro de la fresa:** La herramienta viene representada mediante el diámetro D_c y el diámetro de corte eficaz D_e , se miden en (mm) y son la base del cálculo de velocidad de corte V_c o V_e .

En la figura se pueden apreciar los datos fundamentales de la herramienta.

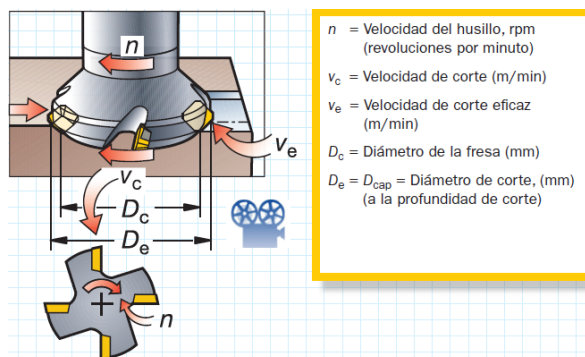


Figura 55. Medidas herramienta de corte.

Otros aspectos a tener en cuenta a la hora de calcular como operar una operación de mecanizado son:

- 4- **Avance:** Hay dos tipologías de avance, el avance por dientes f_z se utiliza para calcular el avance de la mesa de trabajo. Se calcula a partir del calor de espesor máximo de viruta recomendado. El avance por diente se mide en (mm/diente). Avance por minuto (**$V_f = \text{mm/min}$**). Representa el avance de la herramienta con respecto a la pieza, se calcula en función del avance por diente y del número de dientes de la fresa.
- 5- **Numero de dientes:** Representado con la letra **Z_n** se utiliza para calcular el avance de mesa. Además de este hay el numero efectivo de dientes **Z_c** representa el número de dientes que actúan realmente en el corte. Para el cálculo del avance se suele utilizar el avance por revolución **f_n** (mm/rev).

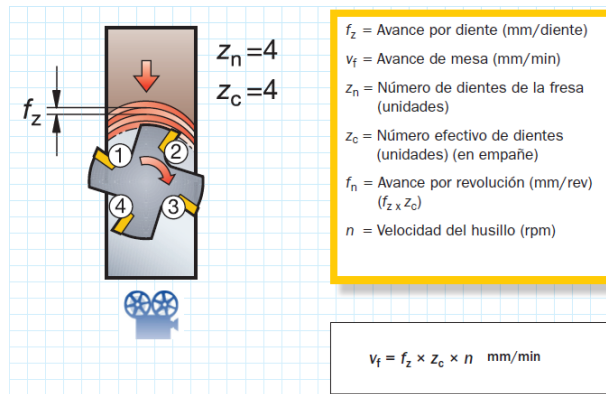


Figura 56. Avance y numero de dientes.

- 6- **Profundidad de corte:** Representada con la letra **a_p** y medida en (mm) es esa parte de material que la herramienta elimina por cada pasada.
- 7- **Anchura de corte:** Representada con la letra **a_e** y medida en (mm) es la anchura de la pieza sobre la que actúa el diámetro e la herramienta.

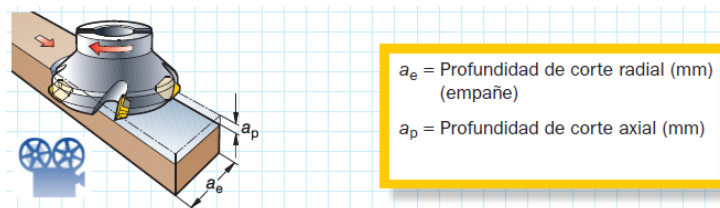


Figura 57. Profundidad y anchura de corte.

- 8- **Potencia neta:** Representada con la letra **P_c** medida en (kW) es esa potencia que debe ser capaz de proporcionar nuestra máquina para que se pueda actuar el mecanizado.
- 9- **Par de corte:** Representado con la letra **M_c** y medido en (Nm) es el par de fuerza que la herramienta produce durante la operación de mecanizado.
- 10- **Fuerza de corte específica:** Representada con **k_c** y medida en (N/mm²) es constante para cada material.

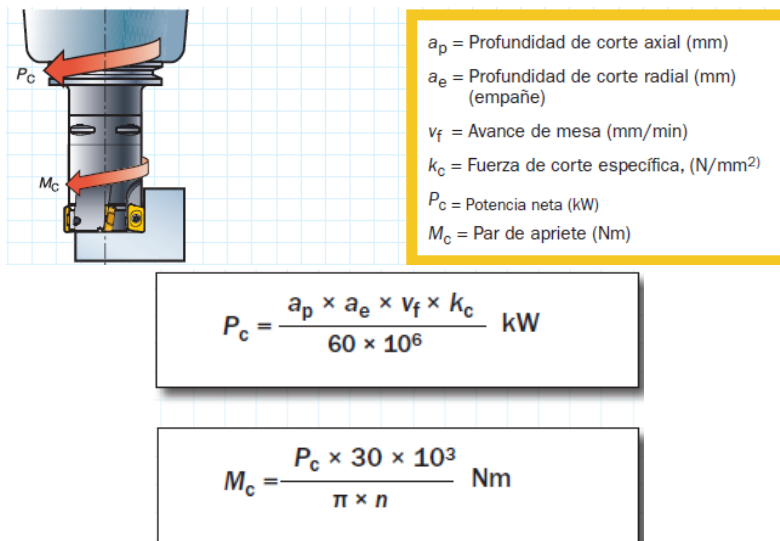


Figura 58. Potencia neta, par y fuerza de corte.

- 11- **Fresado hacia abajo (en concordancia):** Utilizando este tipo de fresado evitamos el efecto de bruñido, produciendo menor calor y se reduce al mínimo la tendencia al endurecimiento mecánico. En esta tipología de fresado la plaquita puede empezar el corte con un espesor de la viruta grande, para terminar con un espesor fino. Es preferible siempre utilizar este tipo de fresado para mejorar las condiciones de mecanizado de nuestras piezas.

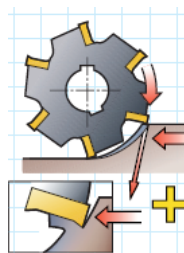


Figura 59. Fresado en concordancia.

- 12- Fresado hacia arriba (en contraposición):** En esta tipología de fresado la dirección de avance de la pieza es opuesta a la dirección de rotación de la herramienta. En esta tipología de fresado el grosor de la viruta empezará desde cero para terminar con un grosor mayor

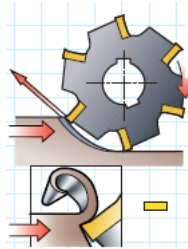


Figura 60. Fresado en contraposición.

- 13- Diámetro y posición de la fresa:** Según la anchura de nuestra pieza vamos eligiendo el diámetro de la fresa. Para el mecanizado es muy importante la posición de la fresa con respecto al empuje de la pieza. Por una operación de fresado se tiene que elegir una fresa con un diámetro 20-50% más grande de la anchura de corte. La regla de 2/3 dice que, si tenemos una fresa de diámetro \varnothing 150mm, 2/3 de corte ósea (100mm) y 1/3 fuera (50mm).

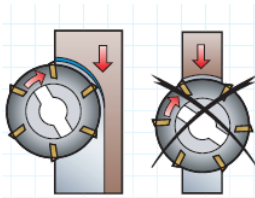


Figura 61. Posición de corte.

- 14- Formación de la viruta según la posición de la fresa:** Hay tres fases en el cual el filo de la fresa tiene contacto con la pieza y son, 1- Entrada, 2- Arco de empuje en el corte, 3- Salida.

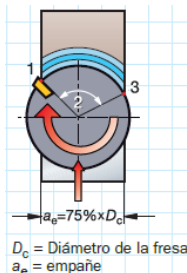


Figura 62. Contacto filo pieza.

La tabla a continuación muestra las posiciones de la fresa con respecto a la pieza.

	<p>La línea central de la fresa queda totalmente dentro de la anchura de la pieza, $a_e > 75\%$ de D_c.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de corte más favorables y el uso más optimizado del diámetro de la fresa. • El impacto inicial a la entrada del corte se produce sobre una parte del filo alejada de la punta sensible. • La plaquita sale del corte de manera gradual.
	<p>La línea central de la fresa queda totalmente fuera de la anchura de la pieza, $a_e < 25\%$ de D_c.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El ángulo de entrada es positivo • El impacto en la entrada se produce sobre la punta más exterior de la plaquita y la herramienta va adquiriendo la carga de forma gradual.
	<p>La línea central de la fresa coincide con el borde de la pieza, $a_e = 50\%$ de D_c.</p> <ul style="list-style-type: none"> • No recomendado. • La carga sobre el filo es muy elevada a la entrada.

+ + = Posición de fresa recomendada.
 + = Posición de fresa alternativa.
 = Posición de fresa no recomendada.

Figura 63. Posición de corte.

15- Fresa esférica

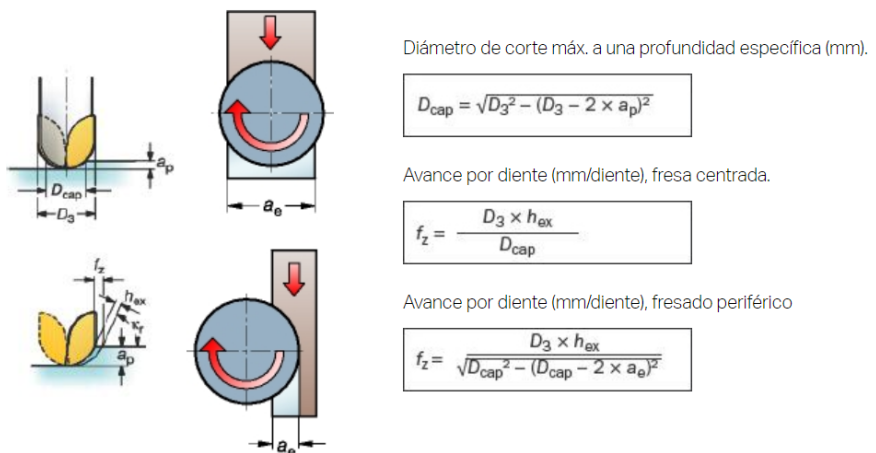


Figura 64. Datos de corte fresa esférica.

4.1.6. Cálculo de datos de corte

En este apartado se van a calcular los datos de corte que se han estudiado en el apartado precedente para las tres fresas que se utilizarán en este trabajo. Una vez conocidos estos datos, se van a introducir en el programa de mecanizado para la creación de la pieza y con éstos se puede mejorar el proceso de mecanizado.

- **Calculo datos corte fresa de planeado \varnothing 63mm**

Lo primero es conocer cuál es la velocidad de corte de la herramienta. Para ello se toman los datos de corte recomendados por el fabricante del material de la pieza en este caso el Toolox 44. Y luego se mira el rango de velocidades que el fabricante de la herramienta aconseja. Con estos dos datos se escoge una velocidad que se ajuste a los datos de ambos fabricantes. Por ejemplo, para la fresa de \varnothing 63 mm de diámetro, que trabaja sobre un acero de 45HRC, Mitsubishi aconseja una velocidad de corte para el proceso de planeado de $V_c = 80$ m/min siendo este dato un promedio entre la velocidad mínima de 60 y máxima de 100 m/min.

VPX300

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

CUTTING SPEED/ WET CUTTING

Work Material	Properties	Cutting Conditions	Insert		ae			
			Grade	Chip Breaker	<0.25 DC	0.25-0.5 DC	0.5-0.75 DC	1.0 DC
					Vc [m/min]			
Mild Steel	<180HB	● ●	MP6120	M	140 [100-190]	130 [90-180]	100 [70-120]	100 [70-120]
			VP15TF	M	140 [100-190]	130 [90-180]	100 [70-120]	100 [70-120]
Carbon Steel Alloy Steel	180-350HB	● ●	MP6120	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
			VP15TF	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
Alloy Tool Steel	<350HB	● ●	MP6130	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
Pre-hardened Steel	35-45HRC	● ●	MP6120	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]
			VP15TF	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]
			MP6130	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]

Figura 65. Velocidad de corte para haceros endurecidos herramienta Mitsubishi.

En las especificaciones técnicas del acero Toolox 44 el fabricante aconseja mecanizar este material a una velocidad V_c entre 100 y 150m/min

Mecanizado

Toolox® 44

Toolox 44 se puede trabajar en máquinas estables convencionales. Es importante utilizar plaquitas con un ángulo de corte positivo y evitando las vibraciones. Utilice las siguientes recomendaciones como directrices y punto de partida para evaluar sus mejores prácticas.

Fresado

Plaquita de metal duro cementado ISO clase P 20

El ángulo de corte debe ser siempre positivo

Velocidad de corte $V_c = 100-150$ m/min

Avance $f = 0.10-0.15$ mm/diente

Velocidad (vri/min) $n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$



Desbaste
Utilice platos con plaquitas circulares

Acabado
Utilice fresas con un ángulo de posición de 45°



Figura 66. Especificaciones técnicas Toolox44.

Se escoge entonces la velocidad V_c máxima y con esta se calcula la velocidad de rotación del husillo.

A continuación, se expondrá el cálculo hecho para la fresa de Planeado tomando como datos de partida las recomendaciones del fabricante y nuestras exigencias.

Los datos de partida que tenemos para nuestro calculo son:

- Velocidad de corte recomendado $V_c = 150$ m/min
- Avance por diente recomendado $f_z = 0.10$ mm
- Numero de dientes de la fresa $Z_n = 6$
- Diámetro de la fresa $\phi 63$ mm
- Profundidad de corte $a_p = 1$ mm
- Empañe $a_e = 42$ mm (El empañe es $2/3$ del diámetro de la fresa)

Los datos que queremos saber para mecanizar son:

- Velocidad husillo n (rpm)
- Avance de mesa V_f (mm/min)
- Velocidad arranque de la viruta Q (cm^3 /min)
- Consumo de potencia de la máquina P_c (kW)

Velocidad del husillo

Datos: $V_c = 150$ m/min y $D_c = \phi 63$ mm

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \text{ (rpm)}$$

$$n = \frac{150 \cdot 1000}{\pi \cdot 63} = 758 \text{ (rpm)}$$

Avance de la mesa

Para: $n = 758$ (rpm)

$$Vf = n * fz * Zn \text{ (m/min)}$$

$$Vf = 758 * 0.1 * 6 = 455 \text{ (m/min)}$$

Velocidad arranque de la viruta

Para: $Vf = 455$ (m/min)

$$Q = \frac{ap * ae * Vf}{1000} \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

$$Q = \frac{1 * 42 * 455}{1000} = 19 \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

Consumo de potencia neta

Para: Material

$$Pc = \frac{ae * ap * Vf * Kc}{60 * 10^6 * \eta} \text{ (kW)}$$

$$Pc = \frac{42 * 1 * 455 * 3000}{60 * 10^6 * 0.8} = 1.19 \text{ (kW)}$$

Para el cálculo de la potencia absorbida por la maquina se ha tomado un Kc según la tabla de la figura siguiente y se ha considerado un rendimiento de la máquina de lo $\eta=0.8$.

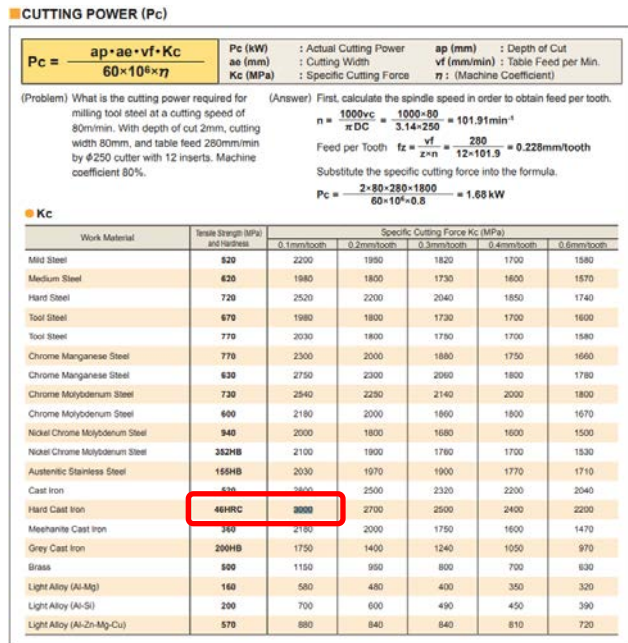


Figura 67. Fuerza específica de corte Kc.

- **Cálculos datos de corte fresa plana ϕ 8mm**

A continuación, se expondrá el cálculo hecho para la fresa plana tomando como datos de partida las recomendaciones del fabricante y nuestras exigencias.

Los datos de partida que tenemos para nuestro calculo son:

- Velocidad de rotación del husillo $n=6000$ rpm
- Velocidad de avance $V_f= 1680$ (mm/min)
- Numero de dientes de la fresa $Z_n = 3$
- Diámetro de la fresa $D_c = \phi 8$ mm
- Solapamiento $W= 10\%$ D_c
- Corte radial max $a_e = 20\%$ D_c en este trabajo 7,6mm
- Corte axial $a_p =$ hasta $2 \times D_c$, en este trabajo 1mm
- Avance por diente recomendado inicial $f_z = 0.10$ mm

Los datos que se quieren calcular para mecanizar son:

- Velocidad de corte $V_c=$ (m/min)
- Velocidad arranque de la viruta Q (cm^3/min)
- Consumo de potencia de la máquina P_c (kW)

En esta tipología de fresa el diámetro nominal D_c es igual al diámetro efectivo D_{cap} así que la velocidad de corte V_c será la de la formula.

Velocidad de corte

Datos: $n= 6000$ rpm y $D_c = \phi 8$ mm

$$V_c = \frac{n * \pi * D_c}{1000} (m/min)$$

Tomando como velocidad de rotación del Husillo lo que aconseja el fabricante en sus tablas n = 6000 (rpm)

$$V_c = \frac{6000 * 3.14 * 8}{1000} = 150(m/min)$$

Velocidad de avance:

$$V_f = f_z * n * z = 1800$$

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS						
Shoulder milling						
Work material	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (-30HRC)		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (-45HRC)		Stainless steel (-1100N/mm²)	
	Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)
CF53, GG25	6	9000	2240	8000	2240	5300
	8	7000	1680	6000	1680	4000
	1.0	5000	1440	4800	1440	3200
	1.2	4000	1200	4000	1200	2700
	1.6	3000	1140	3000	1140	2000
	2.0	2400	860	2400	860	1600
Depth of cut						
D: Dia.						
Slot milling						
Work material	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (-30HRC)		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (-45HRC)		Stainless steel (-1100N/mm²)	
	Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)
CF53, GG25	6	6500	1280	4000	740	3700
	8	5000	1150	3000	670	2800
	1.0	4000	910	2500	530	2200
	1.2	3500	900	2000	530	1900
	1.6	2500	670	1500	390	1400
	2.0	2000	610	1200	350	1100
Depth of cut						

Figura 68. Velocidad de corte aconsejada por el fabricante.

Velocidad arranque de la viruta

Para: Vf = 455 (m/min)

$$Q = \frac{ap * ae * Vf}{1000} \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

$$Q = \frac{1 * 7.6 * 1680}{1000} = 12,77 \text{ (cm}^3\text{/min)}$$

Consumo de potencia neta

Para: Material

$$Pc = \frac{ae * ap * Vf * Kc}{60 * 10^6 * \eta} \text{ (kW)}$$

$$Pc = \frac{7.6 * 1 * 1680 * 3000}{60 * 10^6 * 0.8} = 0.798 \text{ (kW)}$$

- Cálculos datos de corte fresa esférica de plaquitas

Se van a calcular ahora los datos de corte de la fresa esférica de $\varnothing 6$ mm de diámetro.

Se toma como velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte los datos recomendados por el fabricante de la herramienta. En esto caso por un acero de 45HRC La velocidad recomendada según tabla es $Vc= 150\text{m/min}$, el avance por diente es de $ap = 0,2$ mm y la profundidad de corte inferior a $0,05xD$ es decir $ap= 0,3\text{mm}$.

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS						
Work Material	Hardness	Grade	Cutting Speed v_c (m/min)	Feed per Tooth f_z (mm/tooth)	Depth of Cut a_p (mm)	
P	Carbon Steel Alloy Steel	EP6120 VP15TF	200 (80–300)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$	
	Pre-Hardened Steel	EP6120 VP15TF	150 (80–200)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$	
	Alloy Tool Steel	EP6120 VP15TF	150 (80–200)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$	
K	Gray Cast Iron	Tensile Strength $\leq 350\text{MPa}$	MP8010	250 (180–450)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Ductile Cast Iron	Tensile Strength $\leq 800\text{MPa}$	MP8010	200 (80–300)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
H	Hardened Steel	45–55HRC	MP8010	100 (60–120)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.05D_1$
	Hardened Steel	55–65HRC	MP8010	80 (60–120)	0.2 (0.1–0.3)	$\leq 0.01D_1$

Figura 69. Fuerza específica de corte K_c .

A continuación, se expondrá el cálculo hecho para la fresa de punta esférica tomando como datos de partida las recomendaciones del fabricante y nuestras exigencias.

Los datos de partida que tenemos para nuestro calculo son:

- Velocidad de corte recomendado $V_c=150$ m/min
- Avance por diente recomendado $f_z = 0.2$ mm
- Numero de dientes de la fresa $Z_n = 1$
- Diámetro de la fresa $\varnothing 6$ mm
- Profundidad de corte $a_p = 0.3$ mm

Los datos que queremos saber para mecanizar son:

- Diámetro de corte max a una profundidad especifica D_{cap} mm
- Velocidad husillo n (rpm)
- Avance de mesa V_f (mm/min)
- Velocidad arranque de la viruta Q (cm³/min)
- Consumo de potencia de la máquina P_c (kW)

Diámetro de corte máximo

$$D_{cap} = \sqrt{D_3^2 - (D_3 - 2 * a_p)^2}$$

$$D_{cap} = \sqrt{6^2 - (6 - 2 * 0.3)^2} = 2.62 \text{ mm}$$

Velocidad del husillo

Si se utiliza el valor nominal del diámetro de la herramienta al calcular la velocidad de corte o la velocidad de rotación del husillo de una fresa de punta esférica o de plaquita redonda, la verdadera velocidad de corte, v_c , o de rotación del husillo será mucho más baja, si la profundidad de corte, a_p , es superficial. El avance de mesa y la productividad quedarán muy limitadas.

Los cálculos de la velocidad de corte y de rotación del husillo deben estar basados en el diámetro real o eficaz del corte, D_{cap}

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_{cap}} \text{ (rpm)}$$

$$n = \frac{150 * 1000}{\pi * 2.62} = 18.233 \text{ (rpm)}$$

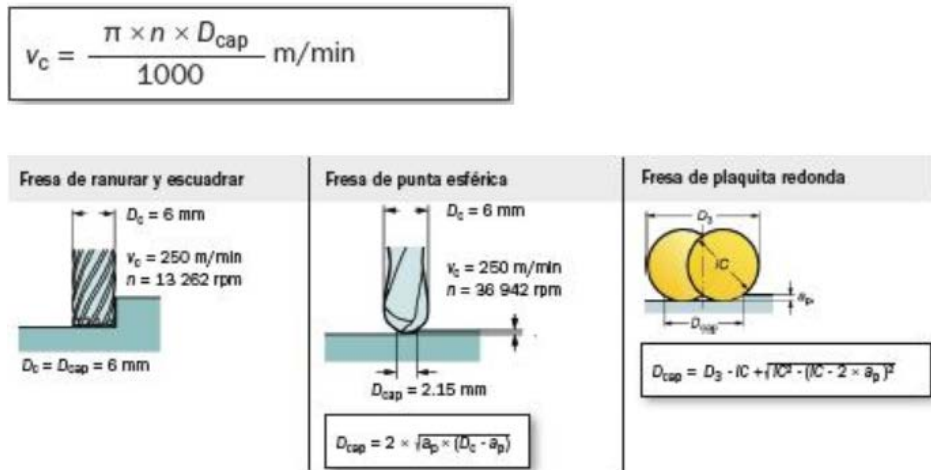


Figura 70. Velocidad de corte real.

4. 1.7. Configuración herramientas Mitsubishi en Fusion 360

Fusión 360 es una herramienta CAD/CAM basada en la nube para el desarrollo colaborativo de productos. Las herramientas de Fusión permiten la exploración e interacción de ideas de productos y colaboración dentro de un equipo de desarrollo de productos. Fusión 360 permite una exploración rápida y fácil de ideas de diseño con un concepto integrado al conjunto de herramientas de producción. Gracias a la funcionalidad de ensamblajes se pueden crear conjuntos para averiguar el correcto modelado de alguna pieza. En el apartado CAM se pueden crear trayectorias de herramientas para mecanizar los componentes. Fusión 360 también ayuda a reunir equipos de diseño para productos colaborativos y de desarrollo. Todos sus diseños se almacenan en la nube, lo que significa que todo el equipo de un proyecto puede acceder a los datos más recientes desde cualquier lugar. Finalmente, con Fusión 360 y A360 se pueden compartir diseños y rastrear la actividad de diseño. Fusión 360 utiliza un entorno híbrido que aprovecha el poder de la nube cuando es necesario y utiliza recursos locales cuando tiene sentido. Por ejemplo, los datos de diseño se almacenan en la nube. Esto permite aprovechar la potencia de la computadora y la potencia de la nube al mismo tiempo.

En esta herramienta software construye una base de datos, utilizando los códigos identificativos de las herramientas que se encuentran en el catálogo de la marca Mitsubishi [8]. Se creará esta base de datos en Fusion 360. Para lograr esto, en el apartado CAM se selecciona el tipo de operación que se quiere realizar, si es 2D o 3D

(fig. 71), y aquí se elige qué operación se va a utilizar. Una vez escogida una opción, por ejemplo, la CONTOUR, se selecciona en el apartado Tool la opción select. (Fig. 72)

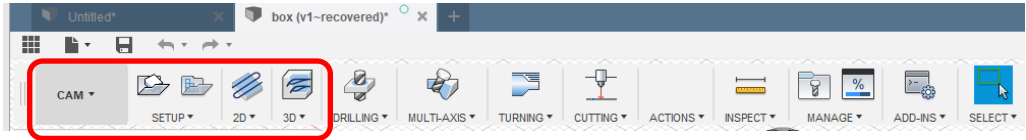


Figura 71. Set up mecanizado

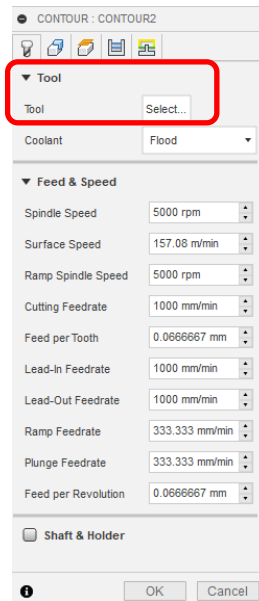


Figura 72. Selección de las herramientas

Se entra en la carpeta SELECT TOOL (Fig. 73) y desde ésta, en el apartado LOCAL, con el botón derecho del ratón, se selecciona la opción New Tool Library (Fig. 74), asignándole como nombre Mitsubishi a la nueva carpeta donde se irá guardando las diferentes configuraciones de las herramientas.

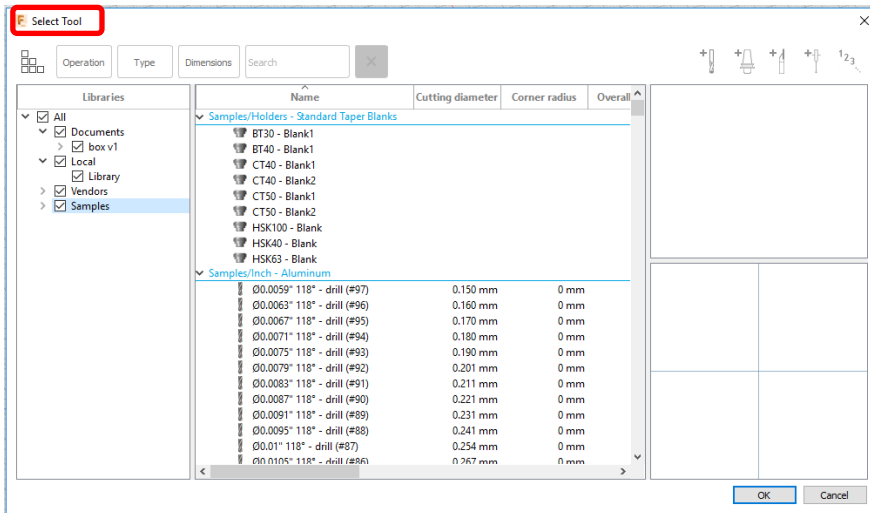


Figura 73. Herramientas de Fusion 360

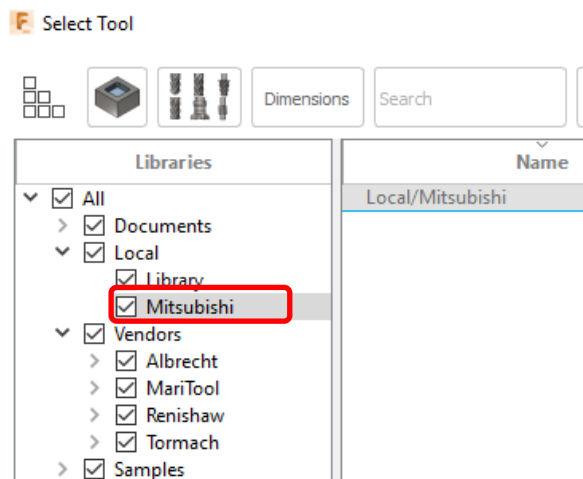


Figura 74. Creación nueva carpeta de herramientas Mitsubishi

Una vez creada la carpeta, para crear y añadir medidas de las diferentes herramientas, se tiene que ir al apartado New Mill Tool (Fig.75) y, pulsando encima con el ratón, se abre la ventana de configuración de la herramienta (Fig. 76).

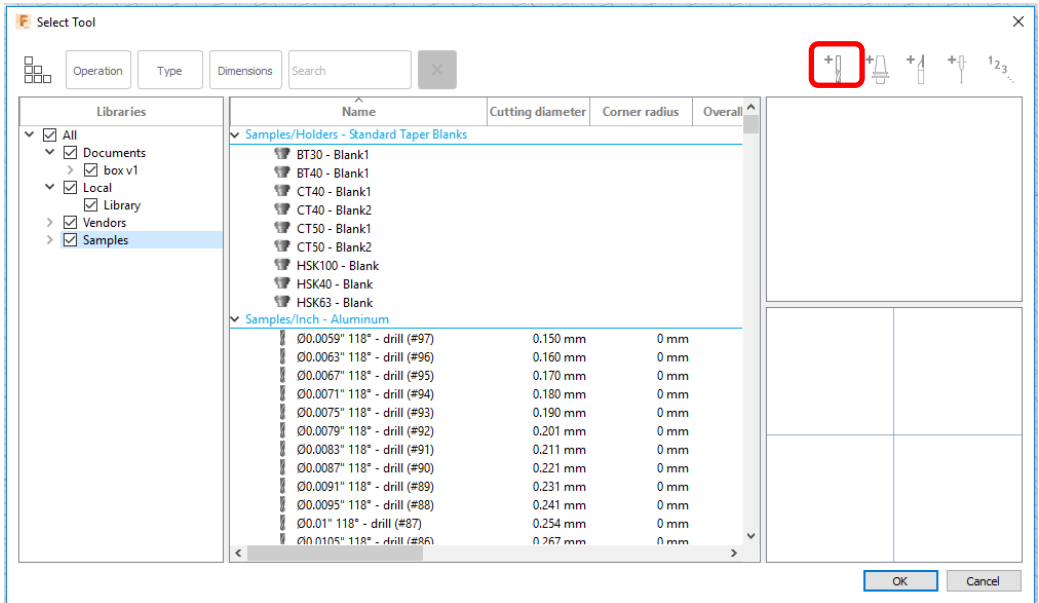


Figura 75. New Mill Tool

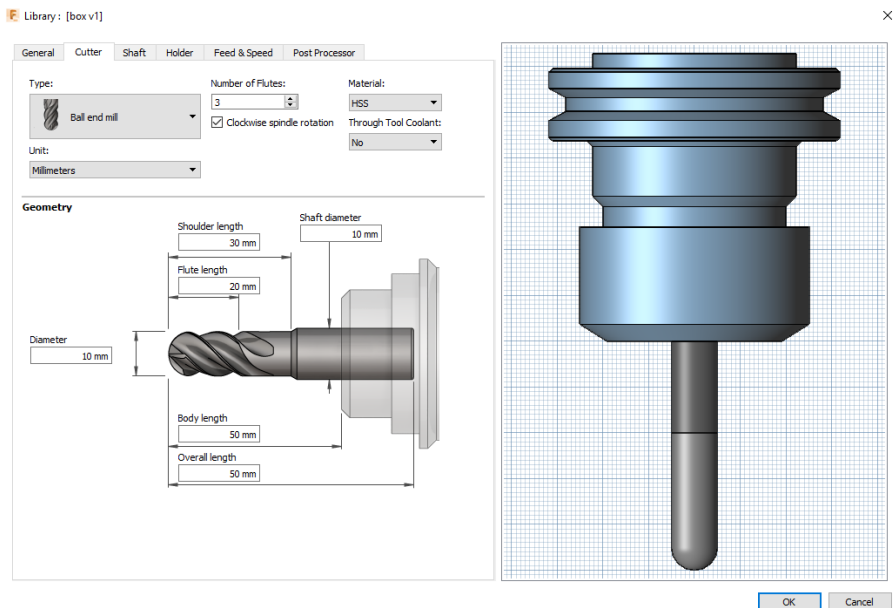


Figura 76. Ventana de configuración herramientas en Fusión 360

Una vez en la ventana de configuración de las herramientas se introducen los datos de las herramientas de la marca Mitsubishi que se obtienen desde la base de datos creada anteriormente en Excel.

TIPO	FABRICANTE	CÓDIGO	MATERIAL	DIÁMETRO	FILOS	LONGITUD	D tornillo	Peso	prof Corte	Max Rev	Plaquitas	Plaquitas Montada
				DC	No.T	LF	DCON	WT	APMX	RMPX	Max spndie	
				mm		mm	mm	kg	mm			
Plato Planear	Mitsubishi	VPX300-063A06AR	INOX	63	6	40	22	0,61	11	0,60°	13 400	LOGU12
MULTI-FUNCIONAL	Mitsubishi	VPX200R2003SA20SA(4523)		20	3	100	20	0,21	8	1,35°	33200	LOGU09
	Mitsubishi	VPX200R2503SA25SA(4611)		25	3	115	25	0,39	8	0,97°	29000	LOGU09
	Mitsubishi	VPX300R2502SA25L		25	2	170	25	0,58	11	2,13°	24100	LOGU12
	Mitsubishi	VPX300R4004SA32SA		40	4	125	32	0,76	11	1,06°	17900	LOGU12
	Mitsubishi	VPX300R3203SA32S		32	3	125	32	0,68	11	1,47°	20600	LOGU12
	Mitsubishi	VPX300-063A06RA(4645)		63	6	40	22	0,62	11	0,60°	13400	LOGU12
	Mitsubishi	VPX300-063A06ARx2PCS		63	6	40	22	0,61	11	0,60°	13400	LOGU12
	Mitsubishi	VPX300-063A06RA(4644)		63			22		11	1,06°		
	Mitsubishi	VPX300R4004SA32SA		40	4	125	32	0,76	11	1,06°	17900	LOGU12
	Mitsubishi	VPX200R1602SA16S		16	2	85	16	0,11	8	1,85°	37900	LOGU09
	Mitsubishi	APX300R121SA16SA		12	1	85	16	0,1	10	6,0°	10500	AO T12

Figura 77. Base de datos herramientas Mitsubishi

Se rellena la carpeta de herramientas de la marca Mitsubishi en Fusion 360.

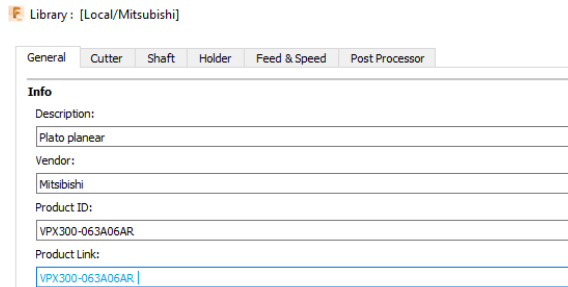


Figura 78. Configuración fresa plana Mitsubishi

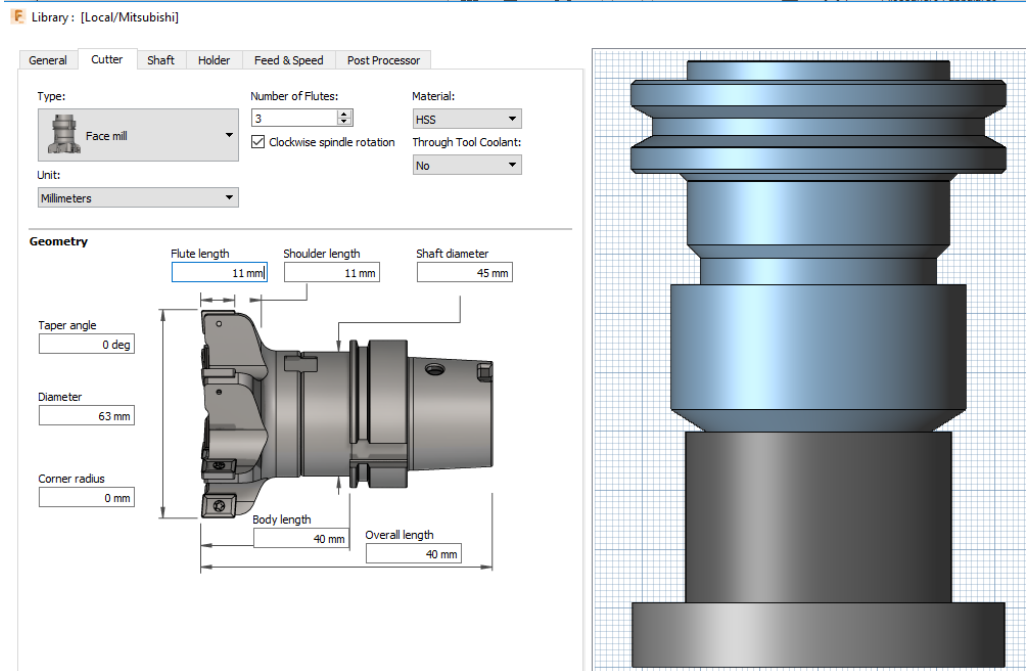


Figura 79. Configuración fresa 63mm de diámetro Mitsubishi

Una vez insertadas todas las herramientas, la carpeta Mitsubishi será así:

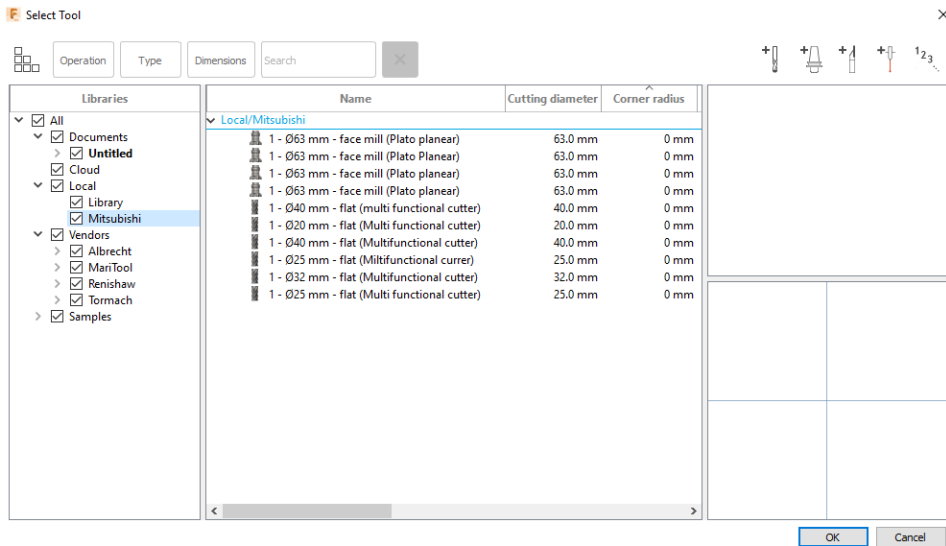


Figura 80. Creación carpeta herramientas Mitsubishi

Las herramientas que aparecerán en esta carpeta serán las herramientas que se utilizarán para el estudio de mecanizado de este proyecto.

4. 1.8. Diseño y requisitos de la pieza a modelar

En este apartado se tratará todo lo que está relacionado con el modelado, partiendo desde el primer diseño de la pieza que se quiere mecanizar, intentado respetar los requisitos básicos que se quieren cumplir. Se harán tres Test con tres diferentes estrategias de mecanizado y entre éstas se escogerá la que mejor resultado dé en base a los tiempos de mecanizado, las trayectorias seguidas para llevarlo a cabo y el acabado.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizará el software Fusion 360, una herramienta de Autodesk que en su apartado Workspace, entre todas las funcionalidades, permite: dibujar modelos 3D utilizando el apartado model, renderizar, crear animaciones y simulaciones para luego mecanizar las piezas con el apartado CAM. Gracias a este software podemos seguir todo el proceso desde el diseño conceptual de la pieza hasta llegar a su fabricación final.

4. 1.9. Modelado de la pieza

Se tendrá que dibujar una pieza que cumpla con una serie de requisitos, velocidad de corte, profundidad de pasada, potencia máxima de la máquina, limitaciones de los ángulos de trabajo y herramientas disponibles.

Se describen a continuación los requisitos a cumplir:

1. La pieza objeto de este trabajo debe poseer geometrías complejas que permitan utilizar los ejes disponibles en la máquina herramienta, de tal forma que si se utiliza una máquina multi-ejes se consiguen mejoras tanto en la productividad como en la reducción de tiempo de fabricación.
2. Para evitar costes, la geometría de la pieza se tendrá que adaptar a las dimensiones y formas de la herramienta, evitando así comprar otras.

4. 1.10.Pre-test con a la herramienta Fusion 360

Para empezar a familiarizar con la herramienta Fusion 360, y descubrir todas sus funcionalidades, se realiza un Test con una geometría de prueba.

Para tal fin se dibuja una geometría, partiendo desde una pieza bruta de material Toolox 44 de dimensiones 100x60x60mm, y sobre ésta se ha generado el código máquina para obtener y simular una pieza de superficies complejas utilizando las opciones de Fusión 360.

La geometría de prueba que se ha dibujado para practicar con el software aparece en la figura81.

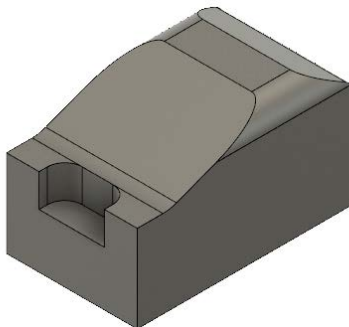


Figura 81. Geometría pieza prueba pre-test.

Para llegar a esta geometría con un proceso de mecanizado se parte de una barra de base, en nuestro caso de dimensiones 100x60x60mm y desde ésta utilizando un programa que lleva la opción del CAM se genera el código máquina útiles para generar la geometría última.

En la figura 82 se puede observar la pieza base de donde se parte para el proceso de mecanizado y la geometría, que se obtendrá después del proceso, inscrita dentro de esta pieza.

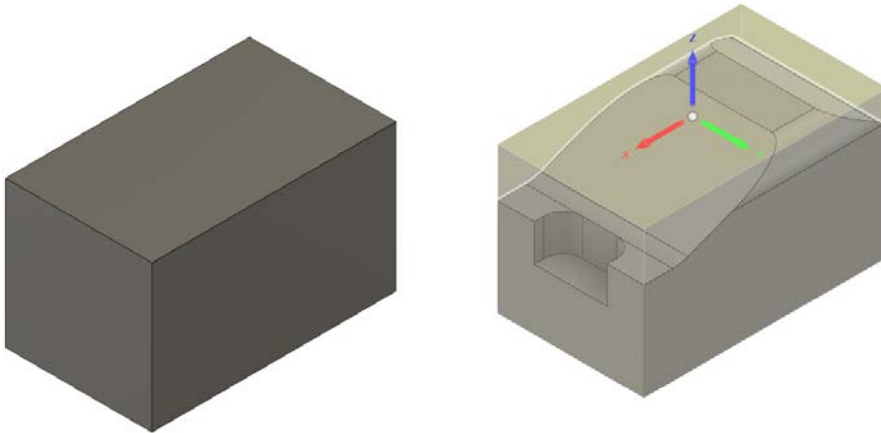


Figura 82. Pieza base y geometría última.

Para empezar con el estudio de una estrategia de mecanizado hay que montar la pieza en la mesa de trabajo de la máquina con la cual se va a trabajar. Se ha escogido la mesa de trabajo de la máquina Gentiger GT-66V, disponible en el taller de mecanizado de la UPV.

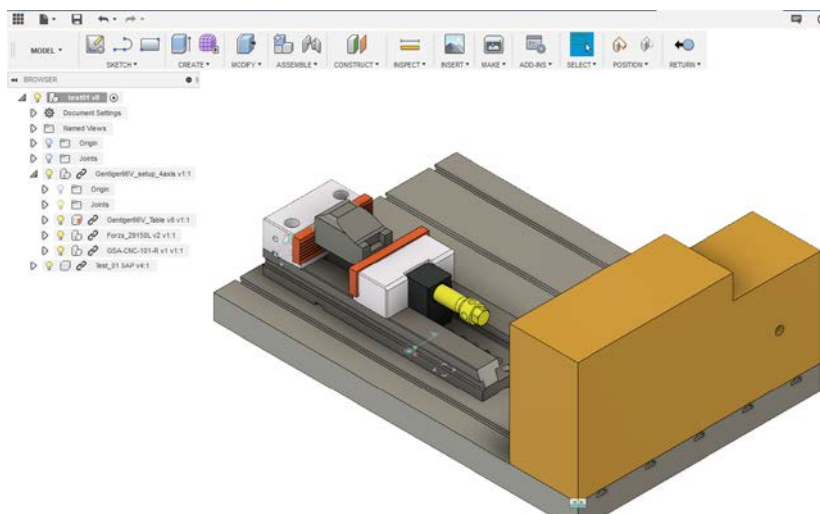


Figura 83. Pieza montada en el espacio de trabajo.

Una vez montada la pieza en la mesa de trabajo virtual, se procede con el setup de la máquina para establecer el material de partida (Stock) y los orígenes del sistema de referencia, llamado también cero piezas. Esto es fundamental para la máquina para saber en qué posición del espacio de trabajo se encuentra la herramienta en un determinado instante. En la figura 84 se puede observar la pieza con el material bruto,

llamado stock, y el sistema de referencia situado en el extremo superior izquierdo de la pieza.

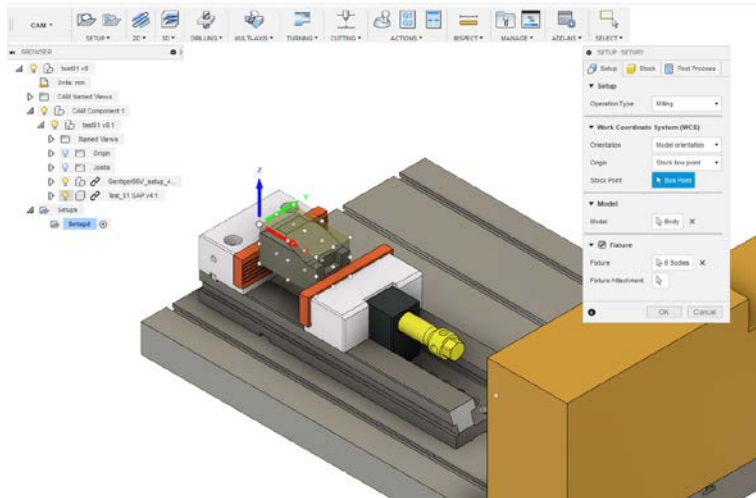


Figura 84. Preparación máquina y espacio de trabajo.

A continuación, se detallará el proceso que se ha realizado sobre la pieza con el fin de entender cómo elegir la mejor estrategia de mecanizado. La primera operación que se actúa sobre la pieza es la de Face milling, desbaste inicial, hecha con una fresa plana de 63mm de diámetro, sirve para eliminar las imperfecciones de la cara y preparar la superficie a ser trabajada.

Test de prueba

En este primer test se analizará la estrategia del mecanizado adaptativo con particular atención en los tiempos máquina y en el número de pasadas de fresa para obtener nuestra superficie. Hay que evidenciar que el acabado superficial no se tendrá en cuenta durante la fase de simulación software porque hasta que no se mecanice la pieza real no se puede apreciar el acabado.

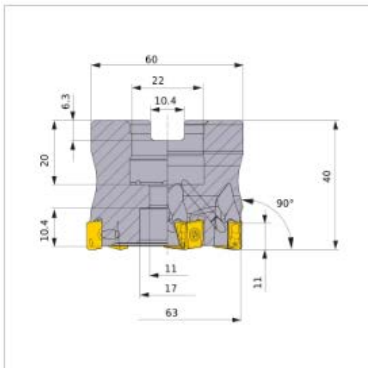
-Operación 1: Fresado Planeado (Face milling), esta operación se aplica para sanear la superficie de la pieza eliminando todas las imperfecciones que pueden estar presentes en la superficie exterior.

Antes de comenzar se selecciona el tipo de herramienta. Se utiliza la fresa plana “Plate milling VPX300-063A06AR” de \varnothing 63mm de diámetro de la marca Mitsubishi. El motivo por el cual se ha utilizado este tipo de herramienta, se debe a que es una de las fresas con mayor diámetro, siendo esto muy importante para eliminar más material por

pasada reduciendo así el tiempo de mecanizado. Esta tipología de fresas tiene buenas aplicaciones para mecanizado radial y axial debido a la disposición de sus filos de corte.

NEW VPX300-063A06AR

Product Information



Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	63
DCON	22
DCSFMS	60
DAH	11
DCCB	17
KAPR	90°
RMPX	0.60°
L8	6.3
LF	40
CBDP	20
LCCB	10.4
KWW	10.4
APMX	11
GAMP	-6°
GAMF	-22.5°
WT	0.61
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	6
RPMX	13400

Figura 85. Fresa toroidal de plaquetas para altas velocidades.

La primera superficie que se mecaniza será la superficie superior de la pieza la cual presenta un sobre espesor de 2mm, por lo que se realizarán dos pasadas, siendo el mecanizado de alta velocidad caracterizado para eliminar pequeñas cantidades de material por cada pasada a bajas velocidades de avance. Aunque con esta herramienta de diámetro \varnothing 63mm podríamos realizar la operación de desbaste en una sola pasada, es preferible, para evitar posibles fallos y desgaste de la herramienta, aplicar más pasadas estableciendo la profundidad de corte axial en 1mm.

Se genera la trayectoria para una pasada en desbaste con dirección establecida en 0°, es decir, paralela a la mayor longitud de la pieza, dejando la extensión de pasada y

stock offset en 0 mm. Esto significa que la fresa no sobresale de la pieza durante los cambios de direcciones. Se asignará 25mm de Stepover, (distancia entre trayectorias paralelas), y por último se ha dado como dirección de corte, las dos direcciones. Se ha establecido una doble pasada con profundidad máxima por pasada de 1 mm.

Utilizando esta configuración se obtiene una trayectoria para el desbaste inicial como la mostrada en la figura 86, con tres pasadas paralelas de la herramienta.

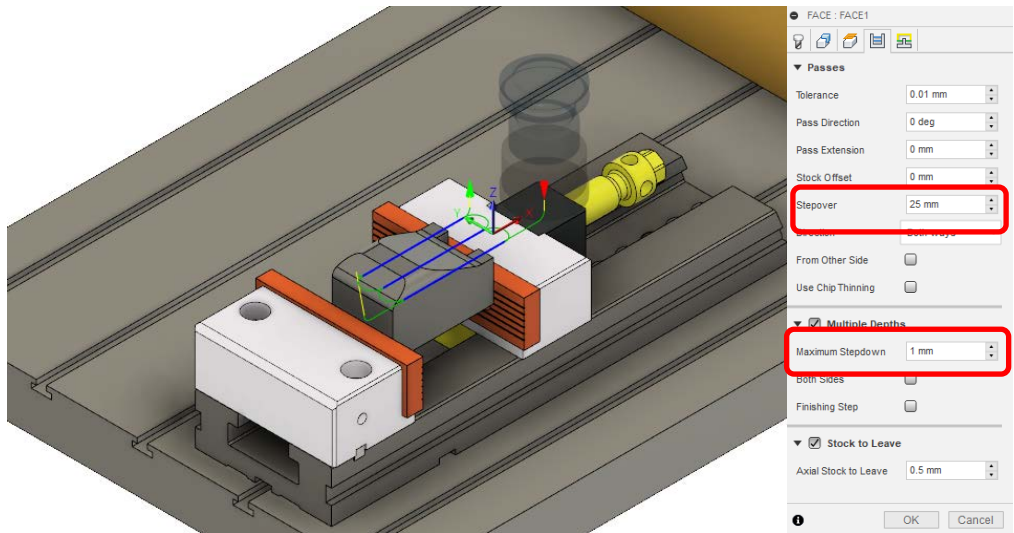


Figura 86. configuración y trayectoria de desbaste.

Una vez simulada esta primera fase de desbaste, se pueden ver los resultados que Fusión 360 proporciona en la sección info de simulación, donde lo más importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar una estrategia de mecanizado es:

1. El tiempo empleado por la máquina en terminar la operación
2. Las colisiones detectadas durante la simulación
3. El material exportado.

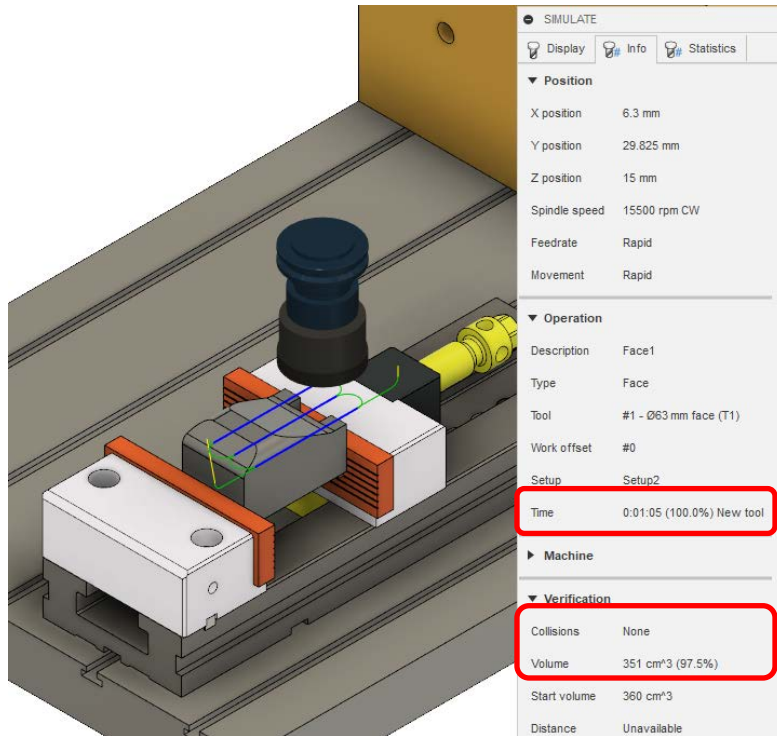


Figura 87. Operación de desbaste, tiempos y colisiones.

Una vez estudiados los tres puntos recién mencionados se intenta mejorar el tiempo de trabajo cambiando alguna función en el setup.

La fresa Face milling empleada para el desbaste tiene un diámetro de \varnothing 63mm. Se ha intentado mejorar el tiempo de desbastado cambiando el Stepover, distancias entre trayectorias en cada pasada, aumentándolo a 35mm.

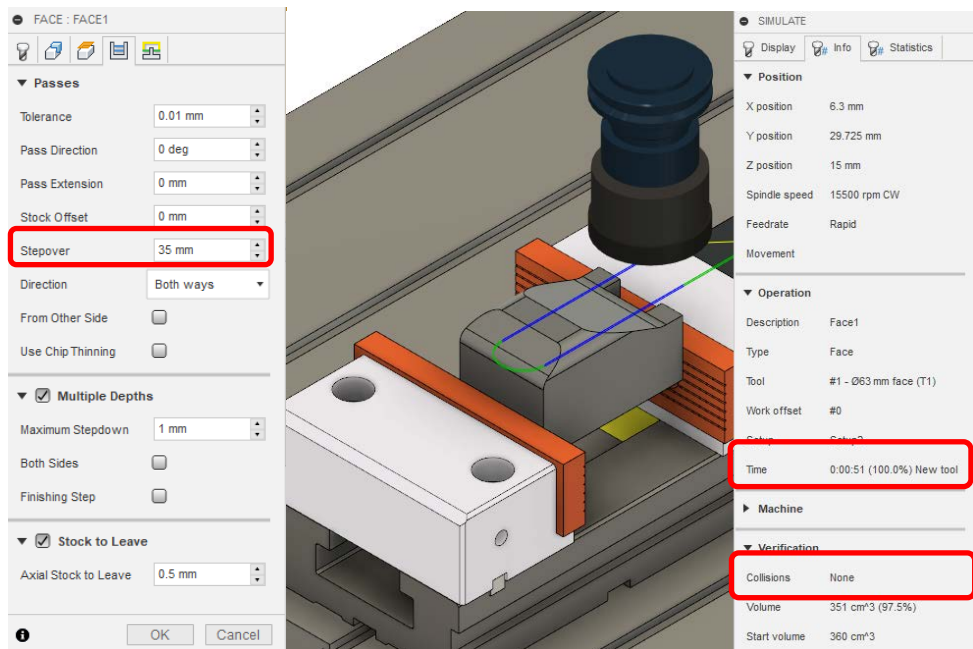
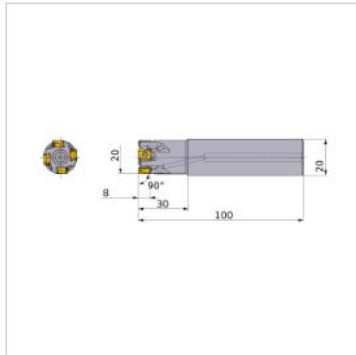


Figura 88. Operación de desbaste con Stepover 35mm.

Se puede notar en la figura 88 que con solo cambiar la distancia de Stepover hemos tenido una mejora en el tiempo de desbaste reduciendo las pasadas de la herramienta a dos. Estas intervenciones en las opciones, si están hechas por una mano experta, llevan a tener un mecanizado de alta calidad y con tiempos de procesos relativamente bajos.

-Operación 2: Fresado adaptativo, utilizando como herramienta para esta operación una fresa plana de plaquetas de $\varnothing 20\text{mm}$ de diámetro de la marca Mitsubishi código: VPX200R2003SA20S, se realiza una operación de desbaste para eliminar material y dejar la pieza con una preforma de su geometría final, la cual se irá terminando con una fresa esférica de alta velocidad de rotación. En esta fase se deja elegir al programa qué trayectoria sería la mejor para luego estudiar y evaluar si la escogida en automático por el programa, es realmente una buena trayectoria, o si necesita de algún ajuste para corregirla o para mejorar los tiempos de proceso y las operaciones.

En la figura 89 se muestra la hoja técnica de la fresa plana de alta velocidad de corte de la marca Mitsubishi.



NEW VPX200R2003SA20S

Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	20
DCON	20
KAPR	90°
RMPX	1.35°
LF	100
LH	30
APMX	8
WT	0.21
Cutting item count: CICT	3
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	3
RPMX	33200

Figura 89. Fresa plana de plaquetas marca Mitsubishi.

Como se ha dicho antes, se ha dejado elegir al programa la mejor trayectoria dejando los ajustes pre configurados. En el primer caso se utiliza la estrategia sin la opción del Machine Shallow Areas.



Figura 90. Datos de partida para el mecanizado adaptativo.

Sin utilizar la opción de Machine Shallow Areas la operación se completa en 3,31 minutos, y no hay ninguna colisión. Esto hace pensar que puede ser una buena estrategia de mecanizado. Pero el acabado de la pieza se queda muy grueso dejando mucho material para quitar al proceso sucesivo, que supuestamente sería lo de acabado.

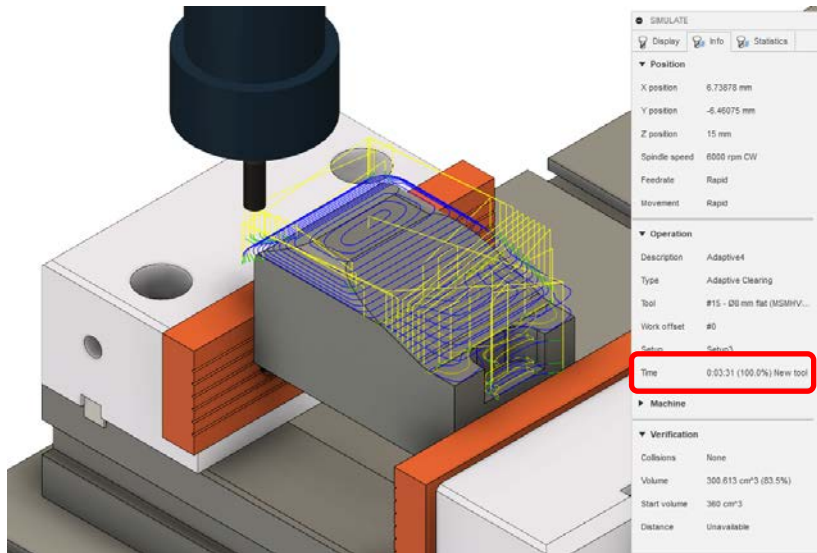


Figura 91. Detalle trayectoria escogida en automático por el programa

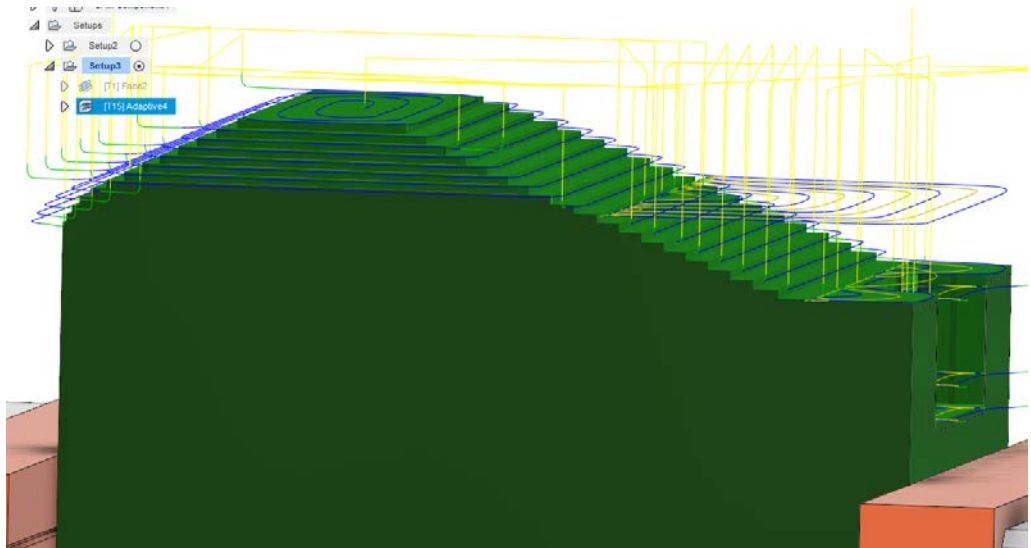


Figura 92. Detalle acabado trayectoria escogida por el programa.

Se procede a ver qué pasaría si en vez que dejar elegir al programa se utiliza la opción Machine Shallow Areas.

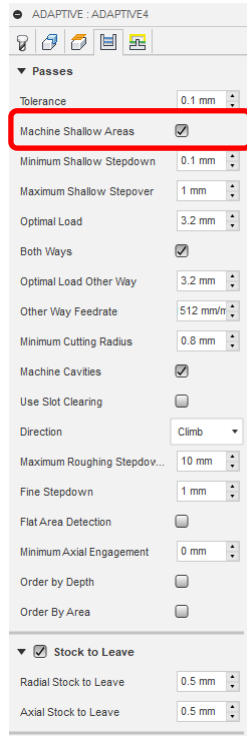


Figura 93. Definición de trayectorias modificada por el usuario.

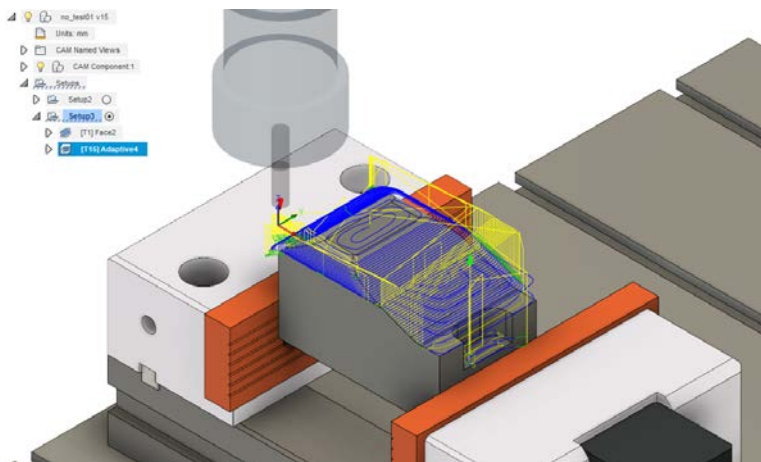
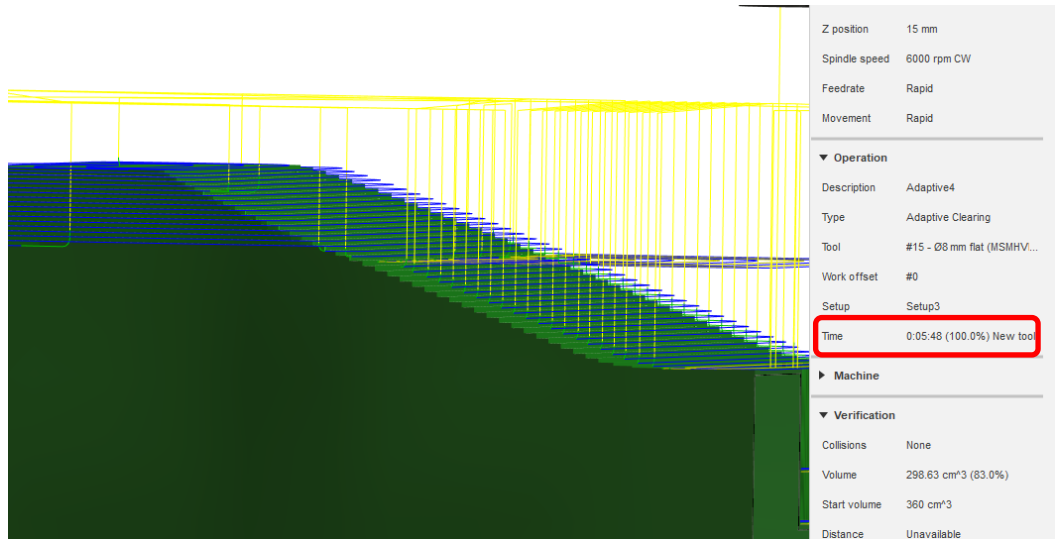


Figura 94. Detalle trayectoria con la opción Machine Shallow Areas seleccionada.

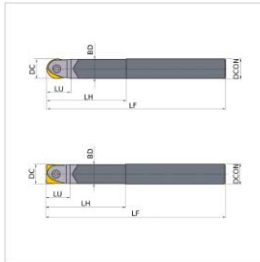
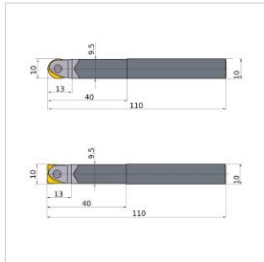
Se puede observar en la figura 95 que con esta estrategia las trayectorias serían más finas y seguramente darían un acabado mejor que el precedente en tema de material sobrante para la operación de acabado. Pero al tener unas trayectorias así de finas con muchas probabilidades, el tiempo de la operación tendrá un notable incremento.

**Figura 95.** Detalle acabado con Machine Shallow Areas seleccionada.

-Operación 3: Acabado superficial para esta operación se ha utilizado como herramienta una fresa esférica de $\varnothing 10$ mm de diámetro de la marca Mitsubishi código: SRFH10S10MW. Se ha escogido una operación de contornado. Las fresas de punta esférica se suelen utilizar para el acabado de superficies, teniendo radio de curvatura suelen eliminar partes de material que por limitaciones geométricas no se logra eliminar con las otras fresas. Gracias al utilizo de fresas esféricas se pueden dejar las piezas acabadas con sus radios de curvatura entre superficies de diferente orientación.

SRFH10S10MW

Product Information



Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	10
DCON	10
BD	9.5
LF	110
LH	40
LU	13
Cutting item count: CICT	
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	
	2

Figura 96. Fresa punta esférica de plaquetas marca Mitsubishi.

Se ha dejado elegir al programa la mejor trayectoria sin modificar las opciones para ver y analizar el proceso y el acabado que nos proporciona esta estrategia automática.

En la figura 97 podemos observar que la trayectoria no presenta colisiones y parece una buena solución.

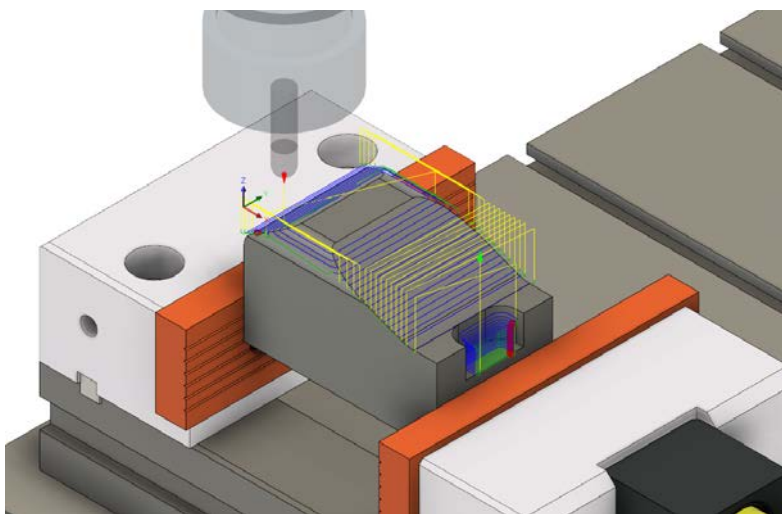


Figura 97. Detalle trayectoria con la operación de contornado con fresa esférica.

Una vez actuada la simulación software se puede observar un acabado no muy bueno. Se pueden observar los surcos que la fresa esférica deja durante sus pasadas figura 98,

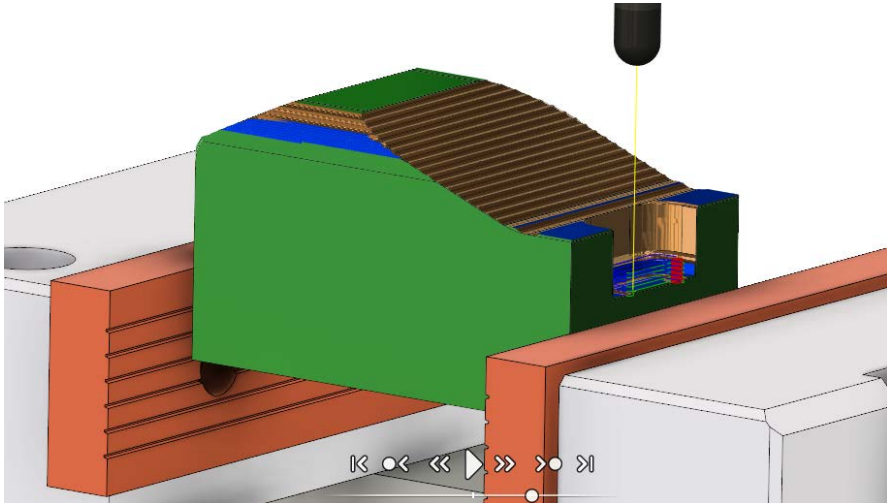


Figura 98. Detalle acabado superficial con fresa esférica.

Llegado a este punto, se decide a intervenir en las opciones de mecanizado para intentar corregir las imperfecciones superficiales “surcos de pasadas” dejadas por la fresa. Se decide modificar la tolerancia de acabado y activar el Machine Shallow Areas en las opciones de pasada y el resultado final es notablemente mejor.

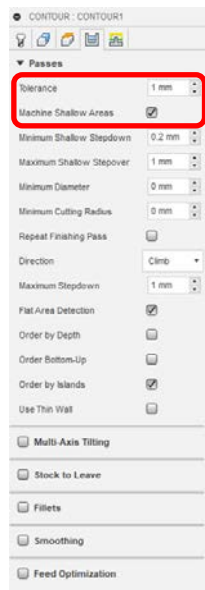


Figura 99. Detalle variación impostazioni de pasada.

Como se puede observar en la figura 100, el acabado superficial con solo modificar dos opciones de pasada ha mejorado notablemente.

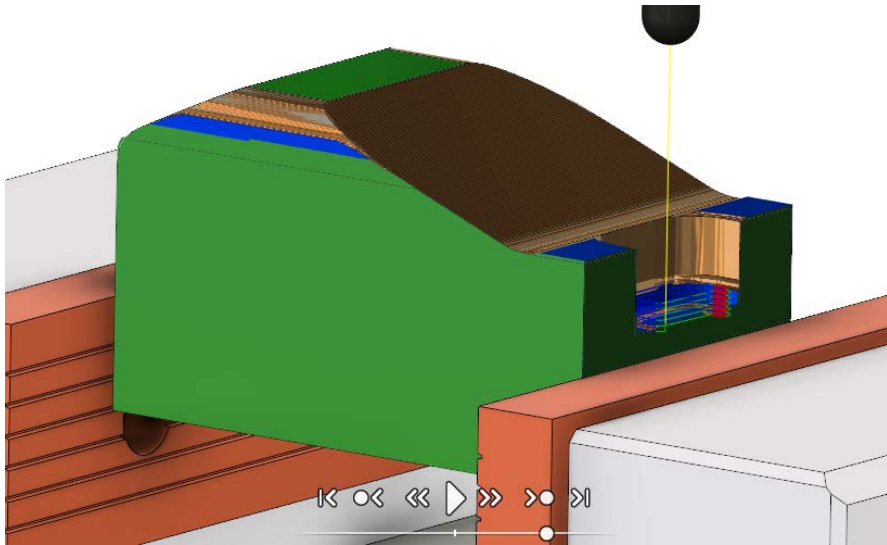


Figura 100. Detalle variación impostazioni de pasada.

El test de prueba ha sido de fundamental importancia para aprender a utilizar el programa Fusión 360 y descubrir todas sus funciones y potencialidades, y entender como poder actuar a la hora de modificar alguna estrategia de trabajo para mejorar el resultado final en tema de tiempos y acabados superficiales.

4. 1.11. Diseño de la pieza definitiva y preparación del entorno de trabajo mediante Fusión 360

A continuación, se expondrá el análisis del proceso definitivo con la pieza escogida para el estudio de mecanizado de superficies complejas, con la idea de proponer una estrategia de mecanizado que nos permita ahorrar tiempo material y reducir los costes de producción de la pieza.

El programa Fusion 360 es una aplicación de Autodesk basada en la nube. Esta aplicación comprende diferentes apartados entre todos CAD, CAM, RENDERING. Permite obtener modelos 3D en el apartado CAD para luego ensamblarlos y/o mecanizarlos en el apartado CAM.

Los ensamblajes que permite realizar, nos dan la posibilidad de comprobar si la estrategia de mecanizado realizada tiene errores o incidencias con los sistemas de fijación de la pieza o con las limitaciones de la máquina.

En este capítulo se analiza el modelado de la pieza y el montaje en el espacio de trabajo (mesa de trabajo) necesarios para la simulación de mecanizado.

Con el fin último de encontrar la mejor estrategia de mecanizado, se ha diseñado una pieza que presente una superficie compleja, y sobre ésta se harán 3 ensayos con diferentes estrategias de mecanizado, escogiendo por cada uno una diferente trayectoria. Por último, se analizará cual de entre los tres ensayos da un mejor resultado teniendo en cuenta el tiempo empleado para acabar el proceso, incidencias, errores, y rendimiento. Finalmente se generará el código máquina para poder hacer las pruebas prácticas en el laboratorio de mecanizado, utilizando la maquina Gentiger GT-66V.

La geometría elegida y dibujada mediante Fusión 360 para este estudio se muestra en la figura 101.

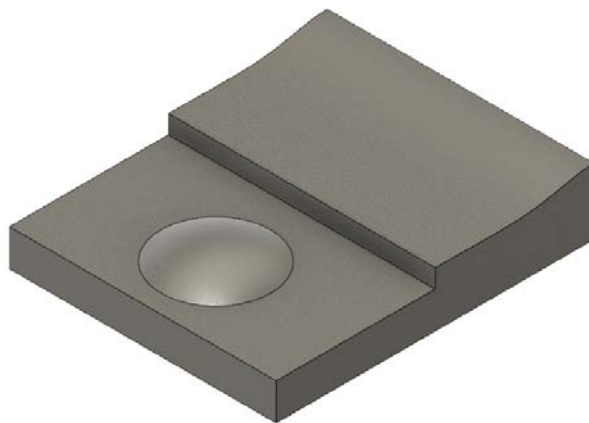


Figura 101. Modelo pieza a mecanizar

Para obtener esta geometría se parte de una pieza de Acero Toolox 44 de dimensiones 87x73x20mm y sobre esta barra de acero se generará el código máquina para obtener la pieza ultima. En la figura 102 se puede observar la barra de partida y la geometría de la pieza inscrita dentro de esta barra de partida.

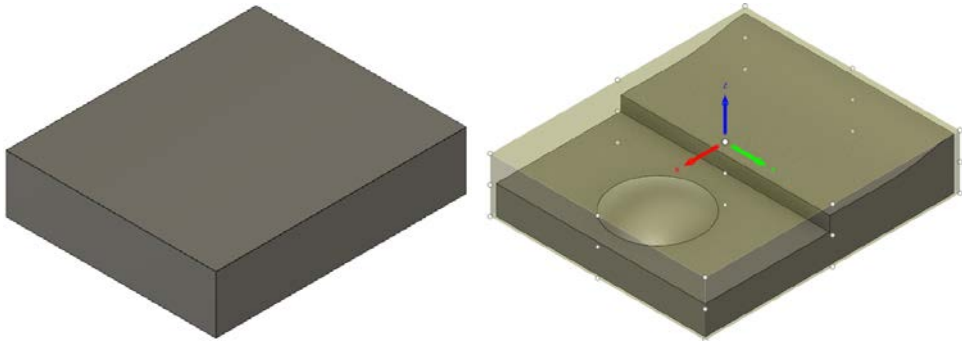


Figura 102. Barra de Toolox44 de dimensiones 100x60x60mm

Se han importado los modelos de la mesa de trabajo y de la mordaza de la máquina Gentiger GT-66V para definir el entorno de trabajo en el cual se hará la simulación con el programa Fusion 360.

Gracias a la opción de ensamblaje se monta la pieza base en la mesa de trabajo, como se puede observar en la siguiente figura.

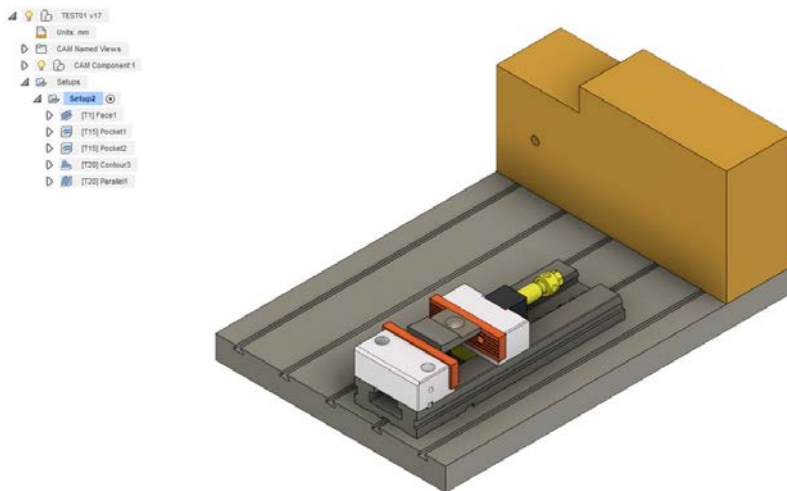


Figura 103. Modelo pieza montada en mesa GT-66V.

4. 1.12. Programación de mecanizado con el software Fusión 360

Fusión 360 permite establecer las estrategias de mecanizado para la pieza que queremos fabricar. Con este software podemos obtener los códigos máquina para las operaciones que hemos planificado en la máquina de control numérico adaptándolas a las diferentes herramientas que hemos elegido. Una vez obtenidos estos programas se pueden obtener y analizar las estadísticas de operación (tiempo de mecanizado,

cambio de herramienta, volúmenes de mecanizado) y también por supuesto la simulación de las operaciones.

A continuación, se detallarán los tres Test que hemos realizado sobre nuestra pieza con el fin último de elegir la mejor estrategia de mecanizado. Los tres Test tienen las tres primeras operaciones iguales que son la de Face milling, desbaste inicial, hecha con una fresa plana de 63mm de diámetro, sirve para eliminar las imperfecciones de la cara y preparar la superficie a ser trabajada.

En la segunda y la tercera operación se utiliza la opción del pocket. Con una fresa plana fija de 8 mm de diámetro, se quita material sobrante y se deja una superficie similar a la que tendrá la última pieza.

4. 1.13. TEST 1:

En este primer test se analizará la estrategia del mecanizado adaptativo con particular atención en los tiempos máquina y en el número de pasadas de fresa para obtener nuestra superficie. Hay que evidenciar que el acabado superficial no se tendrá en cuenta durante la fase de simulación software, porque hasta que no se mecanice la pieza real no se puede apreciar el acabado.

Al empezar un estudio de mecanizado con el software, se tiene que crear un nuevo Setup en el apartado CAM. En esta fase del mecanizado se escoge el material de stock, es decir, el material de partida donde después del proceso de mecanizado se obtiene la pieza mediante exportación de viruta. Se parte de una barra de acero, en nuestro caso de dimensiones 87x73x20 mm de Toolox 44. Hay que saber que esta tipología de acero se vende en barras de 500mm de longitud con diferentes espesores y anchuras. Según las tablas del proveedor, se ha escogido una barra de 500x73x20mm como se puede observar en la tabla de catálogo la figura 104.

PREMIUM Toolox 44 - UNE Toolox 44
 Eco-Präz - plano **500 mm**

Ancho	Espesor [mm]											
	4,3	5,3	6,3	8,3	10,3	12,3	15,3	20,3	25,3	30,3	40,3	50,3
33	39,75	40,98	41,32	41,71	43,75	45,80	49,54	53,12	58,03	64,24		
43	43,24	43,14	43,57	44,06	46,66	49,26	54,00	58,56	64,79	72,68	82,17	
53	45,42	45,29	45,82	46,41	49,57	52,72	58,47	64,00	71,56	81,12	92,64	105,37
63	47,60	47,45	48,07	48,76	52,47	56,18	62,94	69,43	78,32	89,56	103,10	118,07
73	49,78	49,61	50,32	51,12	55,38	59,64	67,41	74,87	85,08	98,00	113,56	130,76
83	51,96	51,76	52,57	53,47	58,28	63,10	71,88	80,31	91,85	106,45	124,03	143,46
93	54,14	53,92	54,81	55,82	61,19	66,56	76,35	85,75	98,61	114,89	134,49	156,16
103	56,32	56,08	57,07	58,17	64,10	70,02	80,82	91,18	105,38	123,33	144,95	168,85
123	88,36	87,78	85,84	82,88	69,91	76,94	89,76	102,06	118,90	140,21	165,88	194,25
143	97,08	96,41	94,16	87,58	75,72	83,86	98,69	112,94	132,43	157,10	186,80	219,64
153	101,44	100,72	98,32	89,94	78,63	87,32	103,16	118,37	139,20	165,54	197,26	232,34
163	105,80	105,03	102,48	93,67	83,67	105,22	126,29	146,51	162,90	181,03	207,73	245,03
183	114,52	113,86	110,80	97,00	100,93	113,87	137,46	160,11	178,46	198,76	228,65	270,43
203	123,24	122,29	119,12	101,70	108,20	122,52	148,64	173,70	194,02	216,49	249,58	295,82
223	131,96	130,91	127,44	113,11	115,47	131,17	159,81	187,30	209,58	234,22	270,50	321,21
243	140,68	139,54	135,76	120,17	122,73	139,82	170,98	200,89	225,13	251,95	291,43	346,61
253	145,04	143,85	139,92	123,70	126,36	144,15	176,57	207,69	232,91	260,81	301,89	359,30
263	149,40	148,17	144,09	127,23	130,00	148,47	182,15	214,49	240,69	269,67	312,35	372,00
283	158,12	156,79	152,41	134,28	137,26	157,12	193,33	228,08	256,25	287,40	333,28	397,39
303	166,83	165,42	160,73	141,34	144,53	165,77	204,50	241,67	271,80	305,13	354,20	422,78
323	175,55	174,05	169,05	148,40	151,79	174,42	215,67	255,27	287,36	322,86	375,13	448,18
343	184,27	182,67	177,37	155,46	159,06	183,07	226,84	268,86	302,92	340,59	396,05	473,57
353	188,63	186,99	181,53	158,99	162,69	187,40	232,43	275,66	310,70	349,45	406,52	486,27

Figura 104. Tabla medidas barras de Toolox 44

Durante la fase de 'Setup' se decide asignar 2mm de sobre material a la cara superior de la pieza, en la dirección Z esto es muy importante a la hora de dibujar cualquier pieza porque con la primera pasada se suelen eliminar los errores geométricos, superficiales y referenciar las geometrías. Se decide también el Cero Pieza, es decir, el origen del sistema de referencia de la pieza de fundamental importancia para la creación del modelo, figura 105.

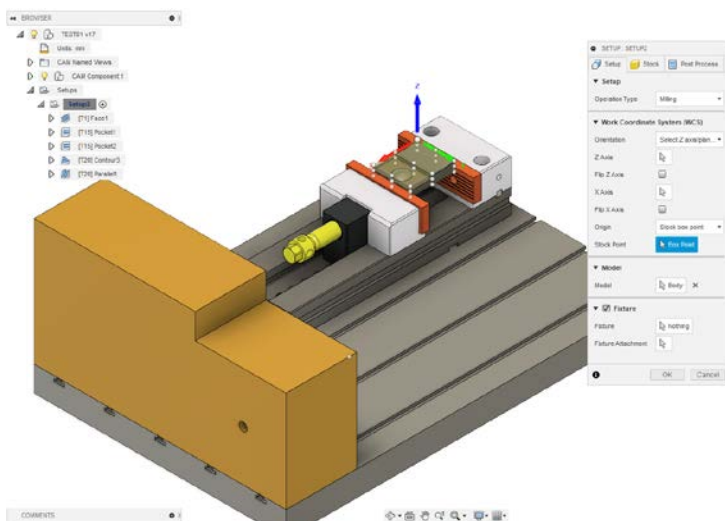


Figura 105. Definición del Setup

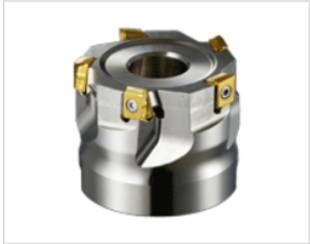
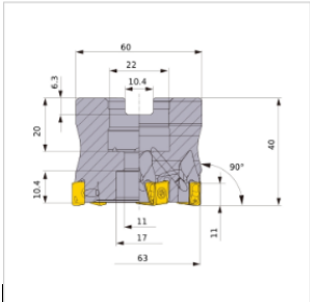
-Operación 1: Face milling, Fresado Planeado, produce una orientación rápida de las piezas, para preparar las existencias brutas para el mecanizado. Una operación de Planeado quita todo el material de la parte superior de la pieza bruta hasta la parte superior del modelo.

Esta operación se aplica para sanear la superficie de la pieza eliminando todas las imperfecciones que pueden estar presentes en la superficie exterior. Para esta operación realizamos un mecanizado de alta velocidad.

Antes de comenzar se selecciona el tipo de herramienta. La fresa toroidal de plaquetas de diámetro \varnothing 63mm es la más idónea para este proceso de planeado. Se utiliza la fresa plana de la marca Mitsubishi "Plate milling VPX300-063A06AR". El motivo por el cual se ha utilizado este tipo de herramienta, se debe a que es una de las fresas con mayor diámetro, siendo esto muy importante para eliminar más material por pasada reduciendo así el tiempo de mecanizado. Esta tipología de fresas tiene buenas aplicaciones para mecanizado radial y axial debido a la disposición de sus filos de corte.

NEW VPX300-063A06AR

Product Information

Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	63
DCON	22
DCSFMS	60
DAH	11
DCCB	17
KAPR	90°
RMPX	0.60°
L8	6.3
LF	40
CBDP	20
LCCB	10.4
KWW	10.4
APMX	11
GAMP	-6°
GAMF	-22.5°
WT	0.61
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	6
RPMX	13400

Figura 106. Datasheet fresa toroidal plana

La superficie superior de la pieza presenta un sobre espesor de 2mm, por lo que se realizaran múltiples pasadas, siendo el mecanizado de alta velocidad caracterizado para eliminar pequeñas cantidades de material por cada pasada a bajas velocidades de avance. Aunque con esta herramienta de diámetro \varnothing 63mm se podría realizar la operación de desbaste en una sola pasada, es preferible, para evitar posibles fallos y desgastes de la herramienta, aplicar más pasadas estableciendo la profundidad de corte axial en 1mm.

Se genera la trayectoria para una pasada de desbaste con dirección a 0°, es decir, paralela a la longitud mayor de la pieza. Como Stepover, (distancia entre trayectorias paralelas), se le asigna 25mm y por último se ha dado como dirección de corte, las dos direcciones. Se ha establecido una doble pasada con profundidad por pasada de 1 mm.

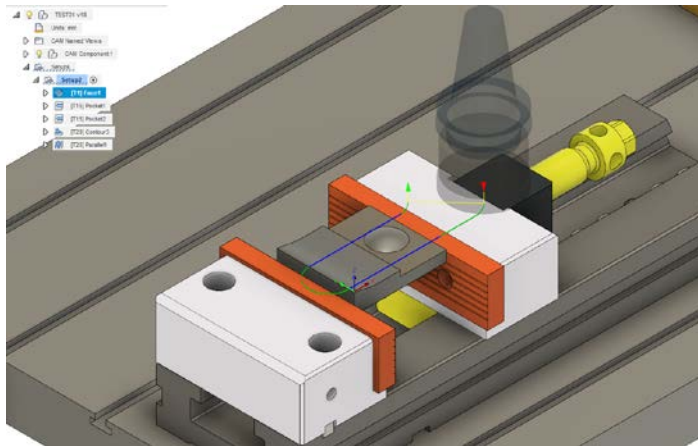


Figura 107. Trayectoria para el planeado

Una vez simulada esta primera fase de desbaste se pueden ver los resultados que Fusión 360 nos proporciona en la sección info de simulación, donde las cosas más importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar una estrategia de mecanizado son:

4. El tiempo empleado por la máquina en realizar la operación
5. Las colisiones detectadas durante la simulación
6. El material exportado.

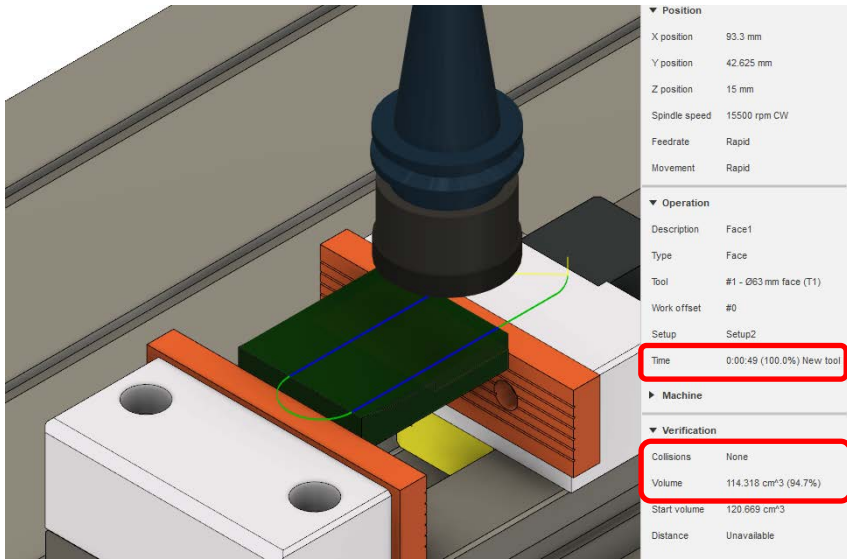



Figura 108. Operación de desbaste

-Operación 2: Pocket, es una estrategia de desbaste convencional para eliminar grandes cantidades de material de manera efectiva. La pieza se viene limpiada capa por capa con contornos de desplazamiento lisos manteniendo el fresado de ascenso durante toda la operación. Para evitar el hundimiento, la herramienta desciende a lo largo de una trayectoria helicoidal entre niveles. Para mantener una alta velocidad de avance y reducir los tiempos de mecanizado, se evitan cambios bruscos de dirección al suavizar el movimiento de la herramienta.

Con esta operación se quiere quitar parte de material en la zona de la pieza donde esta dibujada la semiesfera para poder llegar a obtener la geometría esférica. Para esta operación se utiliza una fresa fija de 8 mm de diámetro de la marca Mitsubishi utilizando la herramienta MSMHVD0800E.

MSMHVD0800E

Product Information

	Diameter (Unit)	
	Stock	●
	Unit of Length	M
	DC	8
	DCON	8
	LF	60
	APMX	19
	Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	4
	Max. Cutting EdgeDiameter Tolerance	0
	Min. Cutting EdgeDiameter Tolerance	-0.02
Coated	MS	

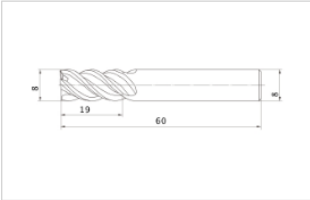
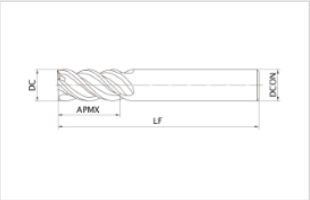
	
---	---

Figura 109. Datasheet fresa plana 8mm

Una vez escogida la herramienta se analizan las opciones de pasada y trayectorias que el programa proporcione. Para esta fase se selecciona la opción Flat Areas Detection y se deja que el programa escoja la mejor trayectoria de trabajo. Una vez generadas las trayectorias se analiza si aparece alguna colisión de la herramienta con la pieza o con la mesa de trabajo, y si no hay colisiones se procede a la simulación para evaluar los tiempos y resultados.

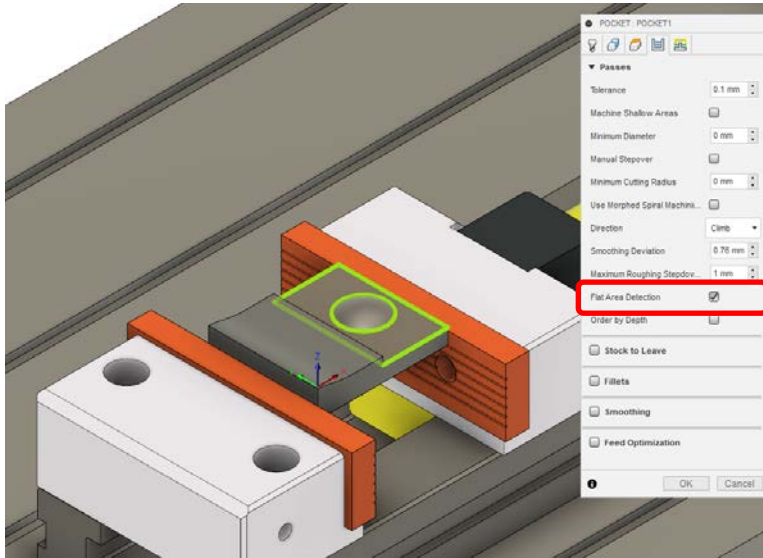


Figura 110. Selección del área de trabajo

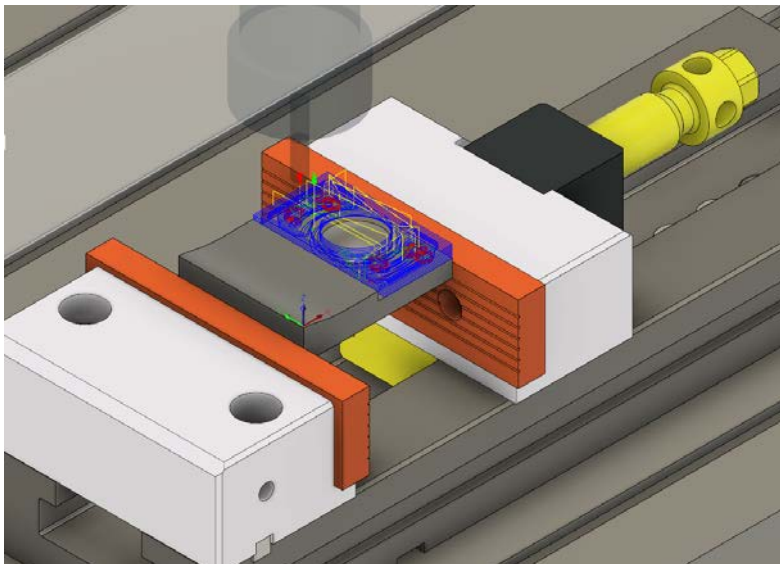


Figura 111. Trayectoria generada para la operación de Pocket

Se realiza la simulación para esta operación de Pocket con la fresa plana y se evalúan los resultados.

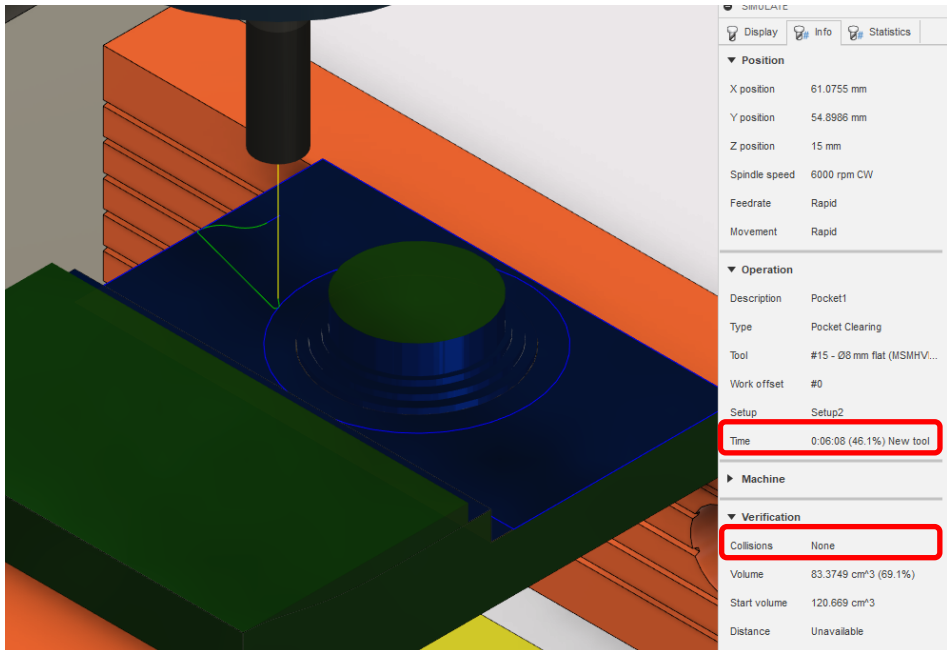


Figura 112. Desbaste con fresa plana

Tras la simulación se puede observar el tiempo máquina, ese tiempo empleado por la máquina en realizar el proceso y también el programa proporciona la presencia o no de colisiones de la herramienta durante su trabajo.

-Operación 3: Pocket, es una estrategia de desbaste convencional para eliminar grandes cantidades de material de manera efectiva. La pieza se viene limpiada capa por capa con contornos de desplazamiento lisos manteniendo el fresado de ascenso durante toda la operación. Para evitar el hundimiento, la herramienta desciende a lo largo de una trayectoria helicoidal entre niveles. Para mantener una alta velocidad de avance y reducir los tiempos de mecanizado, se evitan cambios bruscos de dirección al suavizar el movimiento de la herramienta.

La tercera operación que se ha elegido para esta estrategia es otro proceso de Pocket para desbastar el material sobrante en la otra parte de la pieza para luego poder operar con una fresa de punta esférica para el acabado. También por esta operación se deja el Flat Areas Detection activado y se deja que el programa genere las trayectorias más idóneas para eliminar material sobrante.

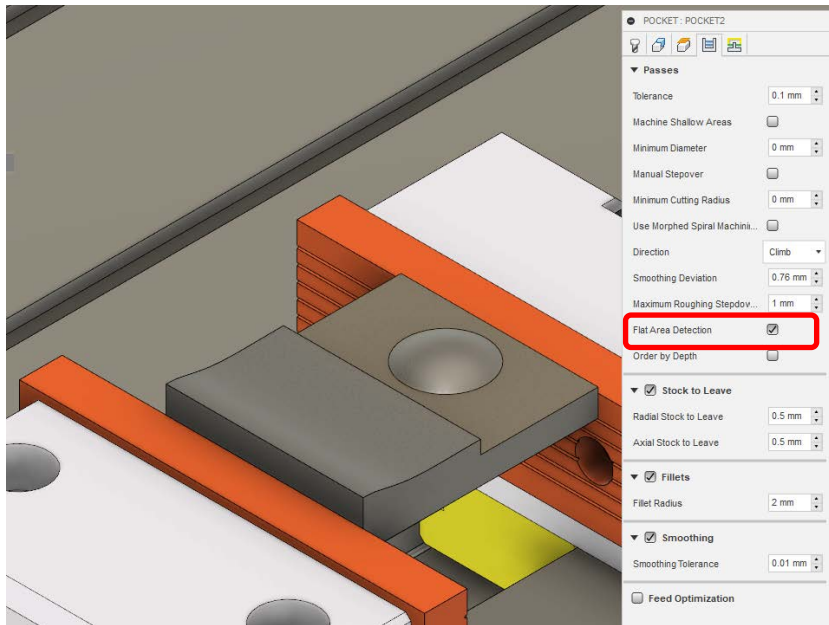


Figura 113. Setup de la tercera operación

En la siguiente figura podemos observar las trayectorias que el programa genera para esta operación, se nota como va quitando material y su trayectoria va a eliminar material sobrante desde la punta de la esfera.

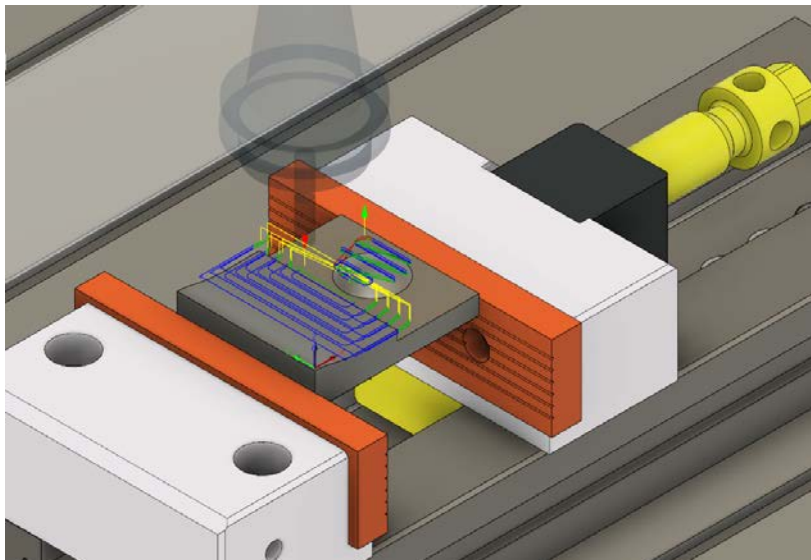


Figura 114. Trayectorias 3 Operación

Tras la simulación se pueden observar tiempos, colisiones y tomar decisiones sobre la estrategia. Para llevar a cabo esta operación la máquina no tarda mucho tiempo, en 1:30 min el proceso viene terminado sin colisiones.

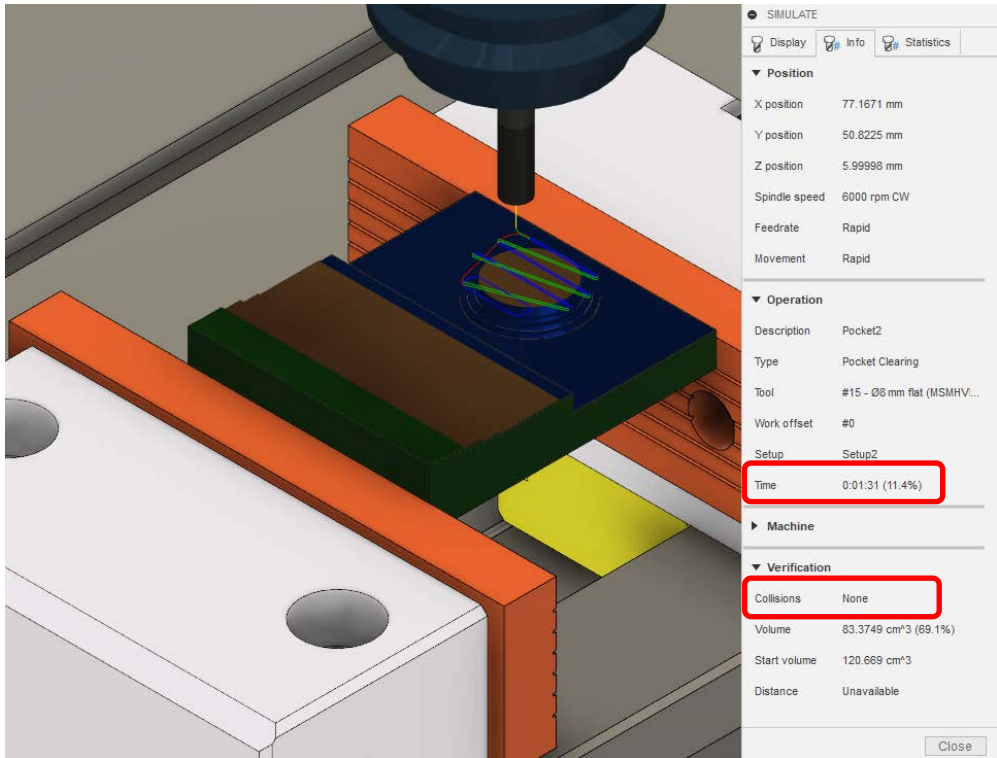


Figura 115. Trayectorias 3 Operación

Las tres operaciones que recién analizadas, la de Planeado y las dos de Pocket serán las mismas que utilizaremos para los tres Test que se van hacer en este trabajo de fin de master. Estas operaciones sirven para preparar la pieza exportando el mayor porcentaje de material y dejarla lista para las dos operaciones de acabado superficial que se utilizaran en este trabajo para el análisis de estrategias de mecanizado para superficies complejas.

Ahora se analizan las últimas dos fases de la estrategia de mecanizado, las más importantes para este estudio.

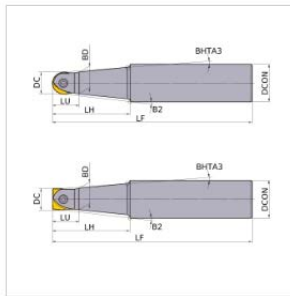
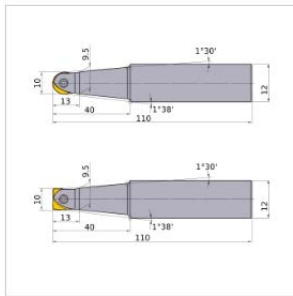
-Operación 4: Contour, operación de contornado, es la mejor estrategia para el acabado de la pared escalonada, pero se puede usar para semiacabados y acabados. Si se especifica un área de pendiente, por ejemplo 30 a 90 grados, las áreas más

inclinadas se mecanizan dejando las áreas menos profundas hasta 30 grados para estrategias más apropiadas.

Para esta operación se utiliza una fresa de plaquetas de geometría esférica de 10mm de diámetro de la marca Mitsubishi, con código: SRFH10S12M.

SRFH10S12M

Product Information



Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	
DC	10
DCON	12
BD	9.5
BZ	1°38'
BHTA3	1°30'
LF	110
LH	40
LU	13
Cutting item count: CICT	
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	
	2

Figura 116. Datasheet fresa esférica Mitsubishi

Hay que evidenciar que, para generar una buena superficie, es importante garantizar que el avance por vuelta ($f_n = f_z \times z_n$) sea inferior al 80% de b_s , cara plana de corte.

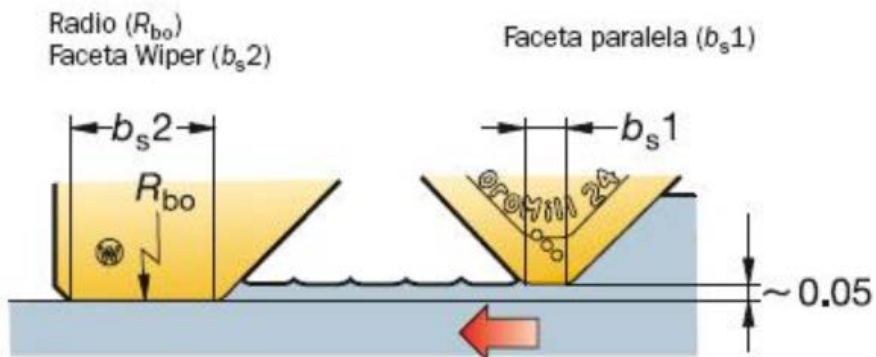


Figura 117. Avance por vuelta

Las fresas de paso reducido incrementan el avance por vuelta. Cuanto más grande es el diámetro de la fresa, mayor será el valor del avance por vuelta f_n , que requiere un valor más alto de bs .

En cuanto el avance por vuelta supera la anchura de esta faceta, la excentricidad axial de la fresa afectará al perfil de la superficie. [11]

Para conseguir el mejor acabado superficial, se utiliza:

- Plaquetas Wiper o plaquetas de fresado con un valor de bs como mínimo un 25% superior a f_n
- Plaquetas cermet para acabado espejo
- Refrigerante para evitar el empastamiento.

Las plaquetas redondas, o las plaquetas con radio de punta grande, aunque resultan extremadamente productivas, no generan una superficie de gran calidad. Cuanto mayor sea el diámetro de la fresa, peor será el acabado superficial. [11]

Se va a establecer como tolerancia un valor de 1 mm y como máximo stepdown 0,2 mm y se deja elegir al programa la mejor estrategia y trayectoria

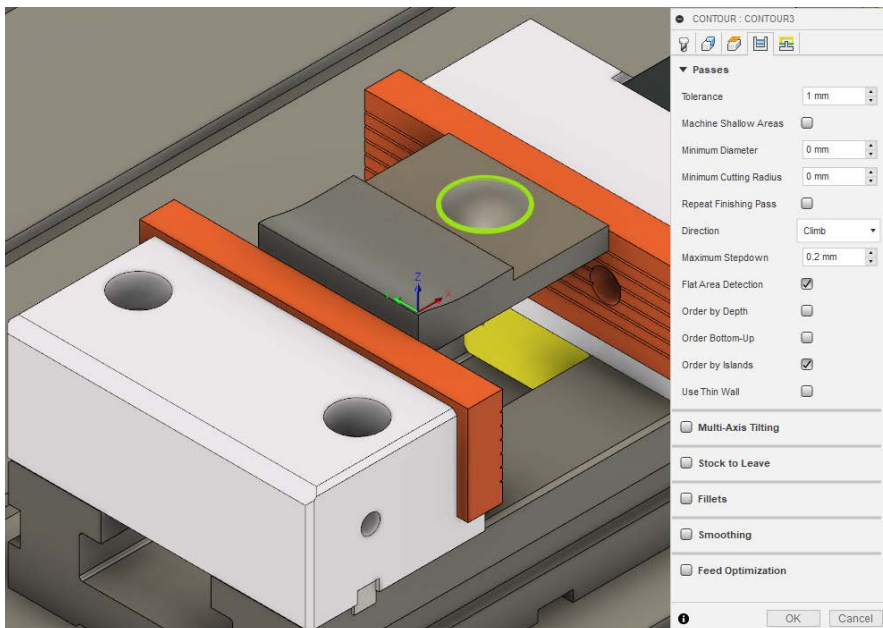


Figura 118. Estrategia de fresado esférico

Se puede observar en la próxima figura que la trayectoria escogida en automático por el programa resulta aparentemente muy buena y bastante fina para dejar un buen acabado superficial.

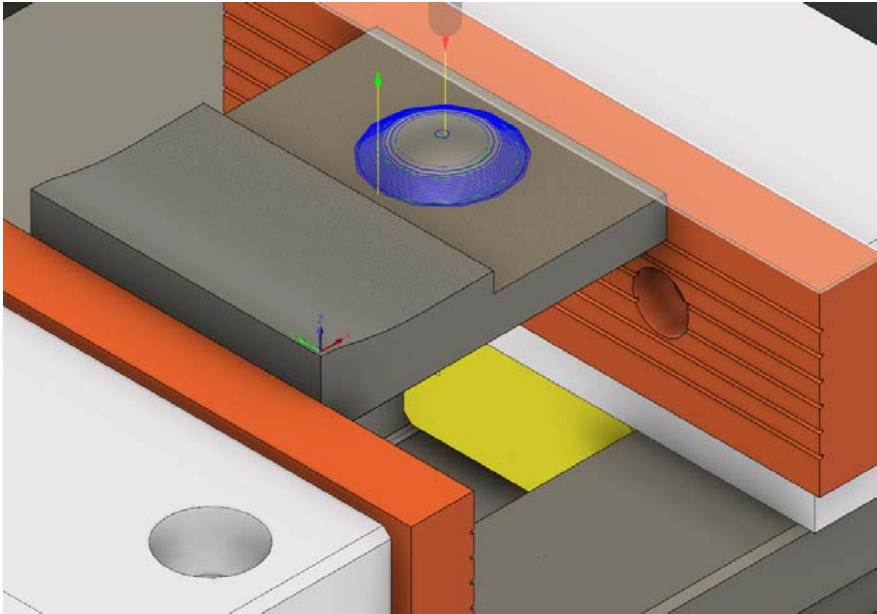


Figura 119. Trayectoria de acabado superficial

Una vez lanzada la simulación software se estudiará y tomaran las decisiones con respecto al acabado.

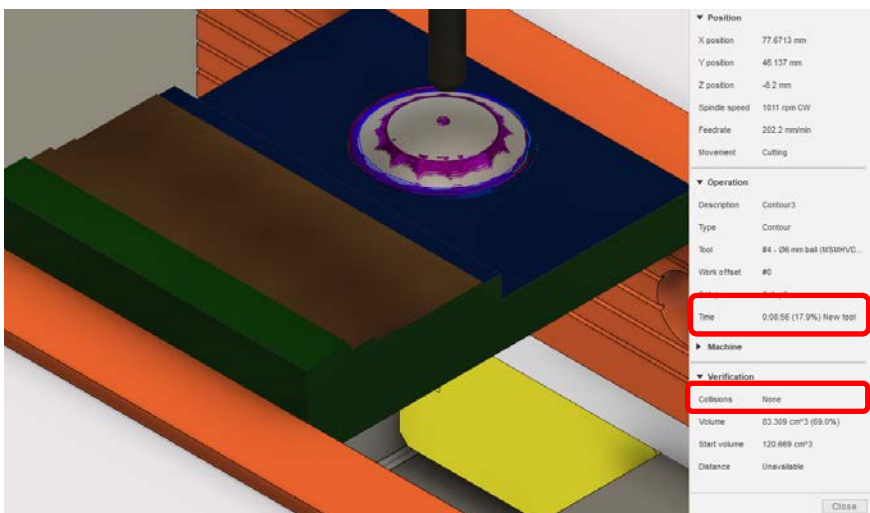


Figura 120. Simulación fresada con punta esférica

Después de haber hecho la simulación del proceso de fresado con punta esférica se puede observar un óptimo acabado superficial y un tiempo de proceso no excesivo, hay que destacar que para los procesos de acabado superficial se gasta más tiempo porque como dicho antes, para generar una buena superficie, es importante garantizar que el avance por vuelta ($f_n = f_z \times z_n$) sea inferior al 80% de b_s . Además se puede observar que el proceso se ha terminado sin colisiones entre la herramienta y la pieza.

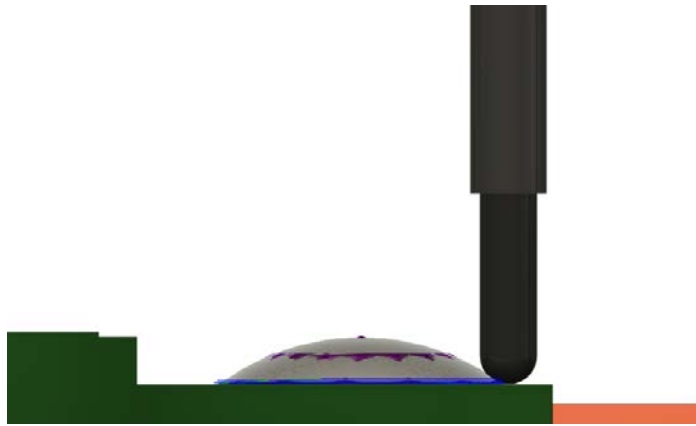


Figura 121. Superficie esférica acabada

Según la simulación software el acabado de la superficie esférica se acabó con un buen resultado, pero no se puede decir sea el mejor resultado hasta que no se mecanice la pieza real.

-Operación 5: Paralel, operación de fresado en dirección paralela, es una estrategia de acabado ampliamente utilizada, las pasadas son paralelas en el plano XY y siguen la superficie en la dirección Z. Se puede elegir tanto el ángulo como el steopover en la dirección horizontal. Las pasadas pueden establecerse en dirección zigzag, unidireccional o dividir hacia abajo o hacia arriba en la sección de fresado.

Para esta operación se utiliza la misma fresa de plaquetas de geometría esférica de 10mm de diámetro de la marca Mitsubishi utilizada en el apartado precedente, con código: SRFH10S12M, pero para una operación diferente.

Para esta operación se deja una tolerancia de 0,01 mm y se elige la superficie a mecanizar como da figura

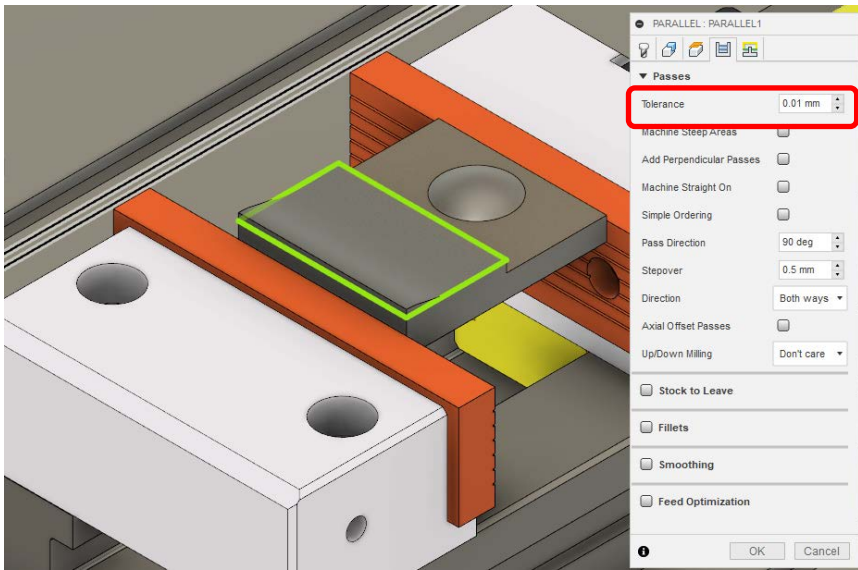


Figura 122. Imposición ultima pasada de acabado superficial

Se deja elegir la estrategia y trayectoria al programa para ver si la opción es buena. Después de la generación de las trayectorias se nota que el proceso se termina sin ninguna colisión y las trayectorias parecen bien dispuestas a lo largo de la superficie.

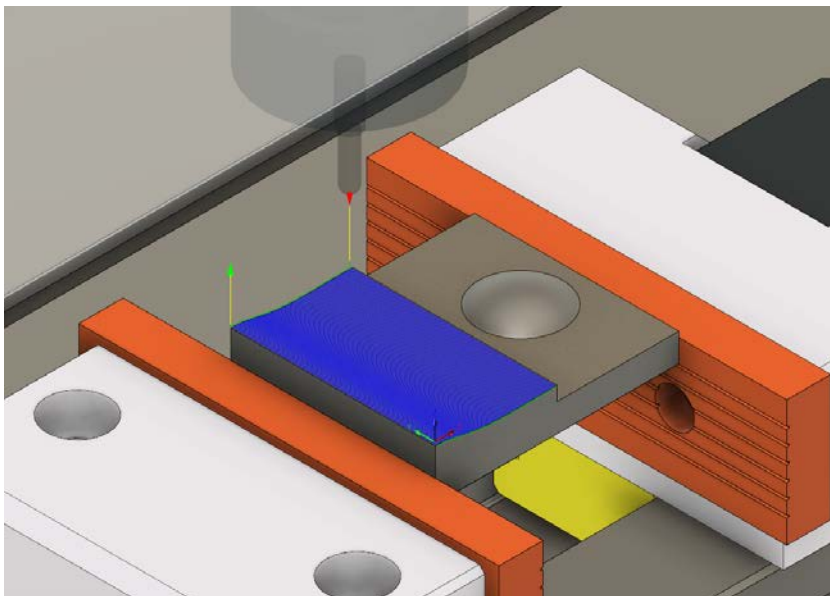


Figura 123. Trayectoria generada para la operación de fresado paralelo

Una vez lanzada la simulación se puede observar el tiempo que emplea la máquina para esta operación es bastante alto, esto porque como dicho antes, para los procesos de acabado superficial se gasta más tiempo porque, para generar una buena superficie, es importante garantizar que el avance por vuelta ($f_n = f_z \times z_n$) sea inferior al 80% de b_s .

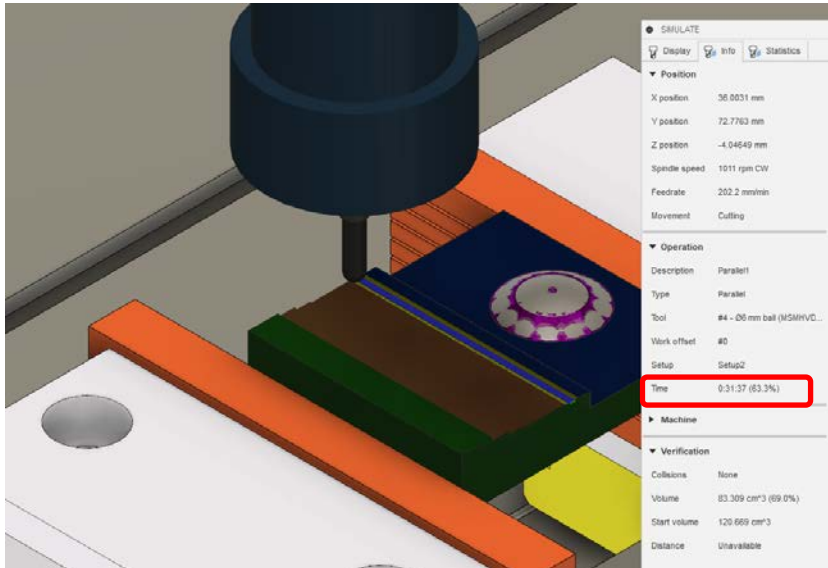


Figura 124. Tiempo de proceso

Al termine de esta operación se observa un acabado superficial muy bueno en lo que es la simulación CAM. Queda comprobar el acabado sobre la pieza real.

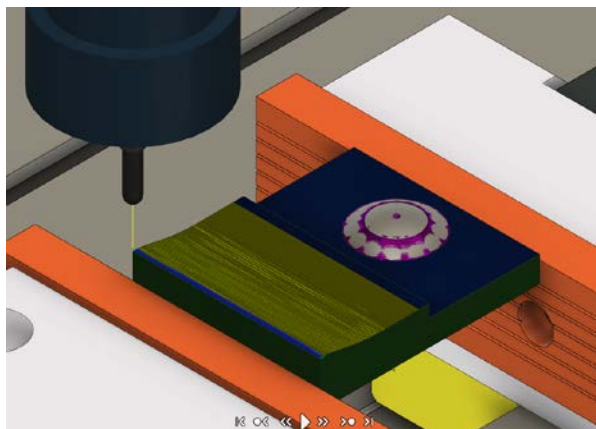


Figura 125. Proceso fresado paralelo terminado

Una vez terminada la estrategia de mecanizado se calcula el tiempo máquina es decir ese tiempo empleado por la máquina en mecanizar la pieza y dejar un producto acabado.

- Tiempo máquina

Por este primer Test el tiempo máquina que Fusión 360 nos facilita es de 49:57 minutos, gastados entre las tres operaciones y los tiempos que la máquina tardaría en cambiar de herramienta.

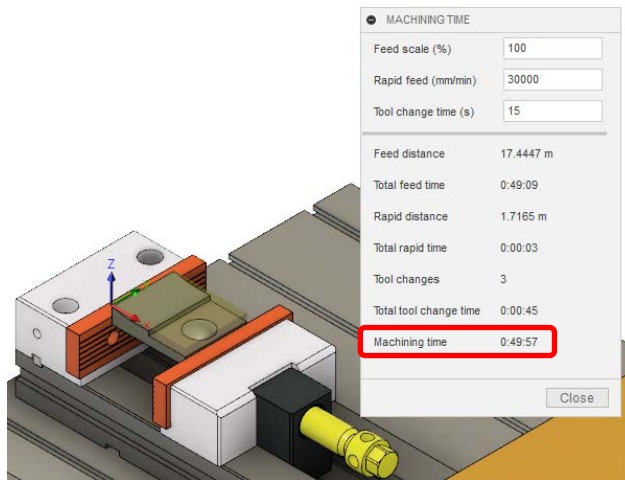


Figura 126. Tiempo máquina Test.1

4. 1.14. TEST 2:

En este segundo test se analizarán las estrategias del mecanizado “scallop”, para la zona de la semi esfera y “morphed spiral” para la otra superficie compleja, con particular atención en los tiempos máquina y en el número de pasadas de fresa para obtener nuestra superficie.

Como dicho en el primer test, las tres operaciones, la de Planeado y las dos de Pocket, hechas para desbastar material son iguales para los tres ensayos por esta razón no se tendrán en cuenta en este apartado, habiéndolas ya ampliamente analizadas en el Test precedente.

-Operación 4: Scallop, estrategia utilizada para el acabado superficial y para terminar una entera pieza. Crea pasadas a una distancia constante y se desplaza hacia adentro la superficie. Con esta estrategia se pueden crear pasadas a distancia constante y se pueden seguir las pendientes y los agujeros verticales para mantener la distancia.

Aunque esta estrategia se puede utilizar para terminar partes enteras, es más comúnmente utilizada para mecanizar áreas de descanso de una pieza de trabajo. Siguiendo una combinación de curvas de nivel y pasadas paralelas.

Se selecciona la superficie esférica a la que se quiere mecanizar con esta estrategia y se pone la tolerancia en 1 mm, estableciendo el link from outside to inside.

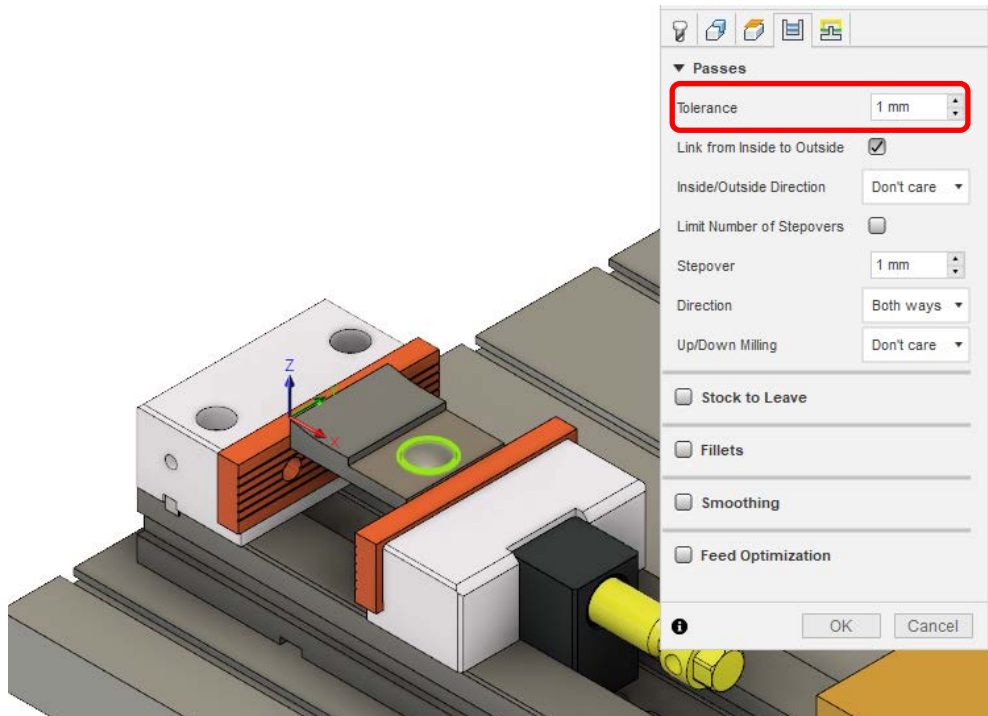


Figura 127. Proceso fresado Scallops

En el apartado Linking se establece el allow rapid retract en 2 mm de distancia de seguridad

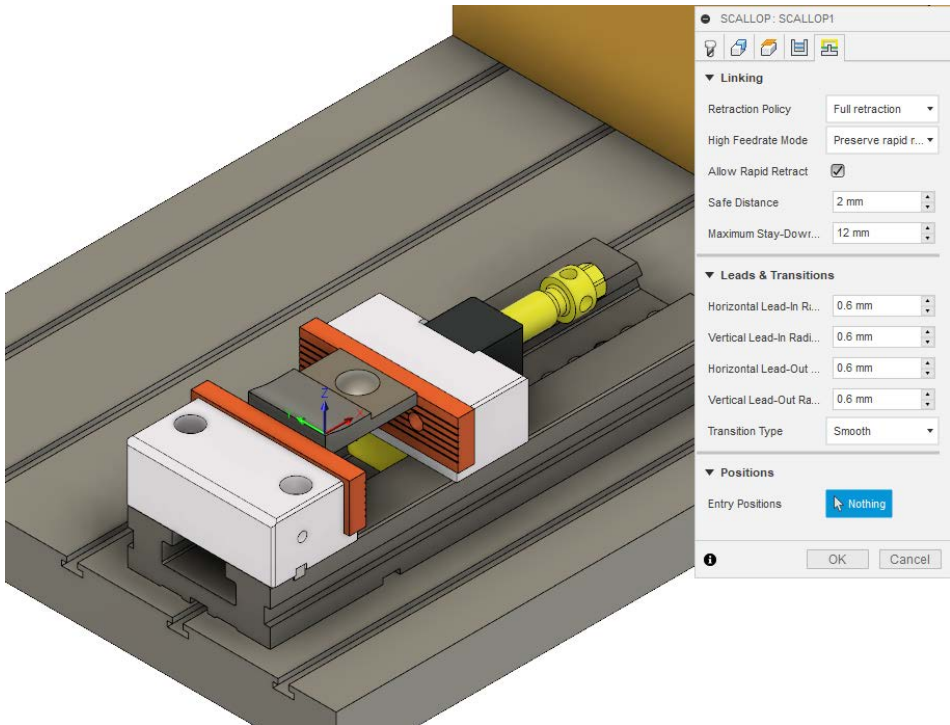


Figura 128. Proceso fresado Scallops

Una vez establecido esto se deja generar las trayectorias para estudiar la funcionalidad y la eficiencia de estas.

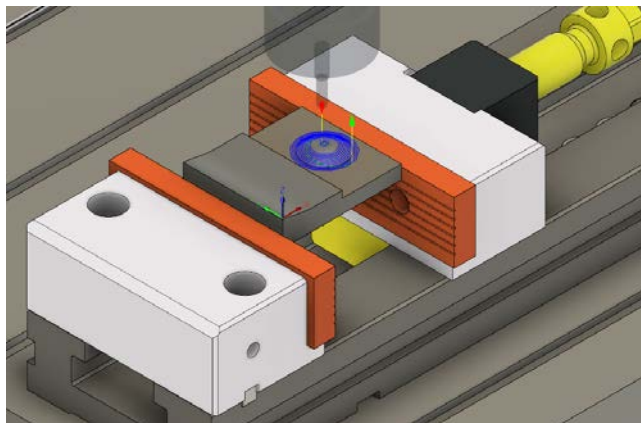


Figura 129. Trayectorias proceso Scallop

El programa proporciona las mejores trayectorias sin colisiones dejando partir el mecanizado desde inside to outside porque se le había dejado como parámetro el de elegir esta opción en automático.

Se deja partir la simulación de Fusion 360 para ver cómo trabaja la máquina y se miden los tiempos de proceso y si se detecta alguna colisión. Como se puede observar en la figura sucesiva el tiempo de proceso es de 5:57 minutos y el proceso se termina sin alguna colisión.

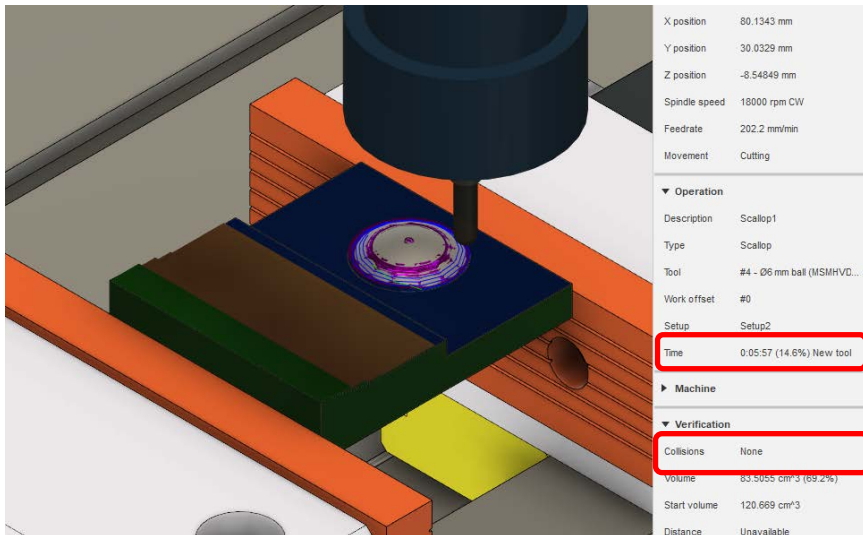


Figura 130. Trayectorias proceso Scallop

Al termine de proceso se observa el acabado dado por el programa y aunque no se puede tomar este dato como definitivo hasta la hora de mecanizar la pieza, parece que el acabado que superficial resultado de la estrategia de Scallop sea muy bueno.

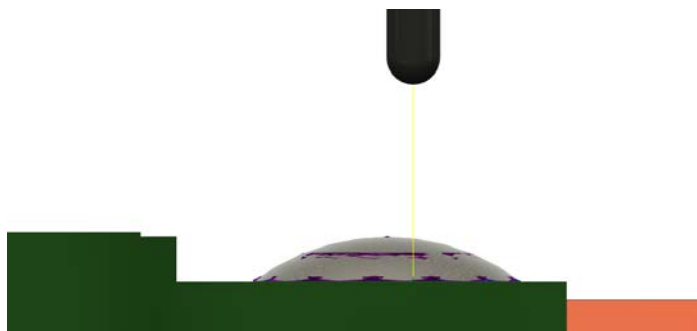


Figura 131. Acabado superficial proceso Scallop

Operación 5: Morphed Spiral esta operación genera la trayectoria del contorno seleccionado, puede usarse para superficies adicionales para las cuales la operación de espiral sencilla no es apropiada. Esta estrategia generalmente proporciona una trayectoria de herramienta mucho más suave que la de Scallop y es muy útil cuando se mecanizan superficies de forma libre.

Se selección a la superficie a la que se quiere aplicar la estrategia de Morphed Spiral y se deja escoger al programa la mejor estrategia, dejando una tolerancia de 1 mm. Una vez generada la trayectoria se evalúa si es una buena opción o si se necesita de alguna corrección de trayectoria cambiando los datos en el set del programa para mejorar algún punto de esta estrategia.

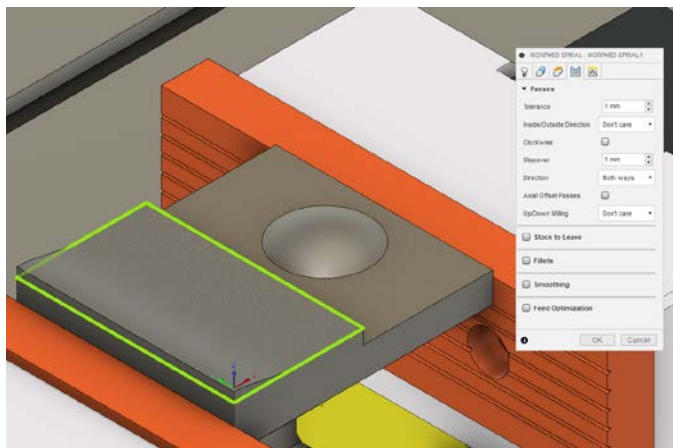


Figura 132. Estrategia Morphed Spiral

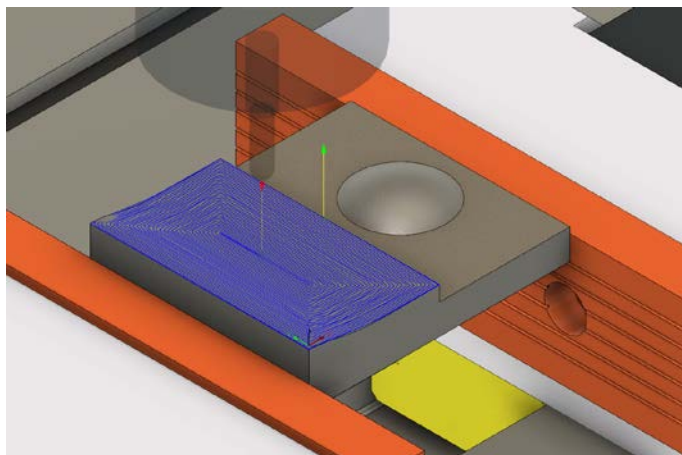


Figura 133. Trayectoria Morphed Spiral

En la trayectoria generada por esta estrategia la herramienta entra desde el centro de la superficie seleccionada y cumple un recorrido en espiral hacia el exterior como se puede observar en la simulación software, en la figura sucesiva.

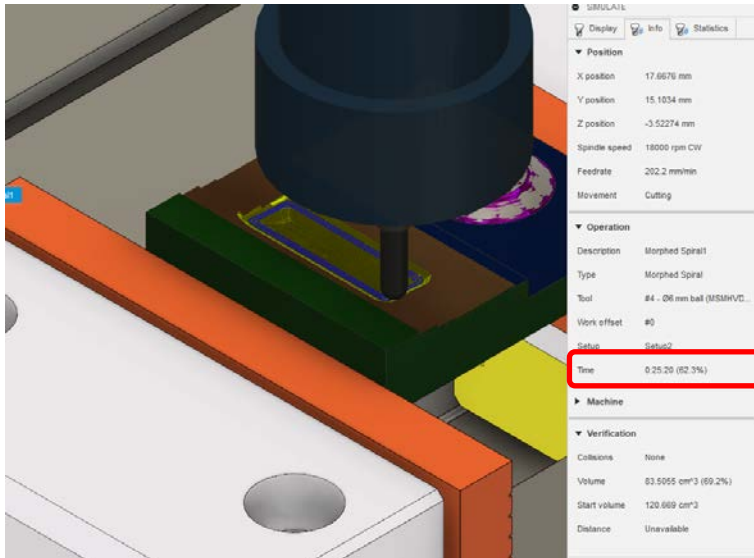


Figura 134. Simulación trayectoria Morphed Spiral

Se puede observar que el tiempo de mecanizado para esta operación es de 25:20 minutos esto porque en los procesos de acabado siempre se gasta más tiempo porque la fresa hace pasadas muy cercanas con velocidad de corte muy alta, pero con velocidad de avance muy lenta.

- **Tiempo maquina Test.2**

Para el segundo test las estrategias de mecanizado que se han escogido dan como resultado final un tiempo máquina de 40:48 minutos incluyendo en esto los cambios de herramientas que la maquina actúa entre una estrategia y otra.

Se estudiarán los tiempos máquina de los tres ensayos para escoger el que mejor acabado de en menor tiempo.

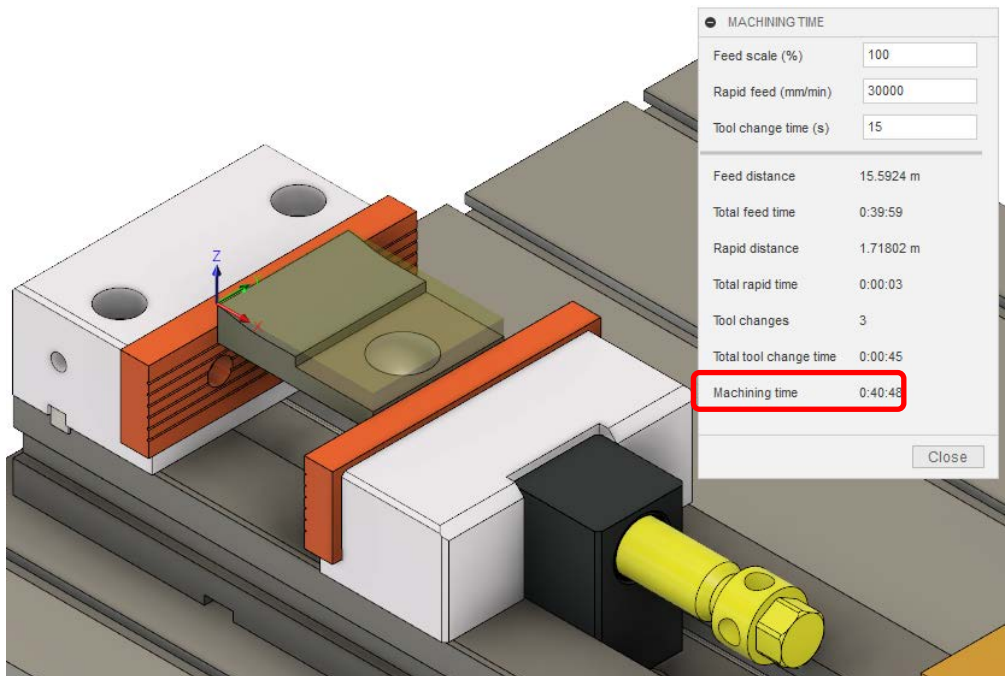


Figura 135. Tiempo maquina Test.2

4. 1.15.TEST 3:

En este tercer test se analizarán las estrategias del mecanizado “morphed spiral”, para la zona de la pieza donde está la semi esfera y la estrategia “Radial” para la zona donde se encuentra la otra superficie compleja, haciendo particular atención en los tiempos máquina y en el número de pasadas de fresa para obtener nuestra superficie.

Como dicho en el primer test, las tres operaciones, la de Planeado y las dos de Pocket, hechas para desbastar material son iguales para los tres ensayos por esta razón no se tendrán en cuenta en este apartado, habiéndolas ya ampliamente analizadas en el primer Test.

-Operación 4: Morphed Spiral, esta operación genera la trayectoria del contorno seleccionado, puede usarse para superficies adicionales para las cuales la operación de espiral sencilla no es apropiada. Esta estrategia generalmente proporciona una trayectoria de herramienta mucho más suave que la de Scallop y es muy útil cuando se mecanizan superficies de forma libre. Se aplica en este Test a la superficie semi esférica para ver qué resultado proporcionaría.

Se selecciona la superficie esférica a la que se quiere mecanizar con esta estrategia y se pone la tolerancia en 0.01 mm y el stepover en 0.2mm se deja el programa libre de elegir la trayectoria que mejor resuelve el problema de acabado superficial de esta área.

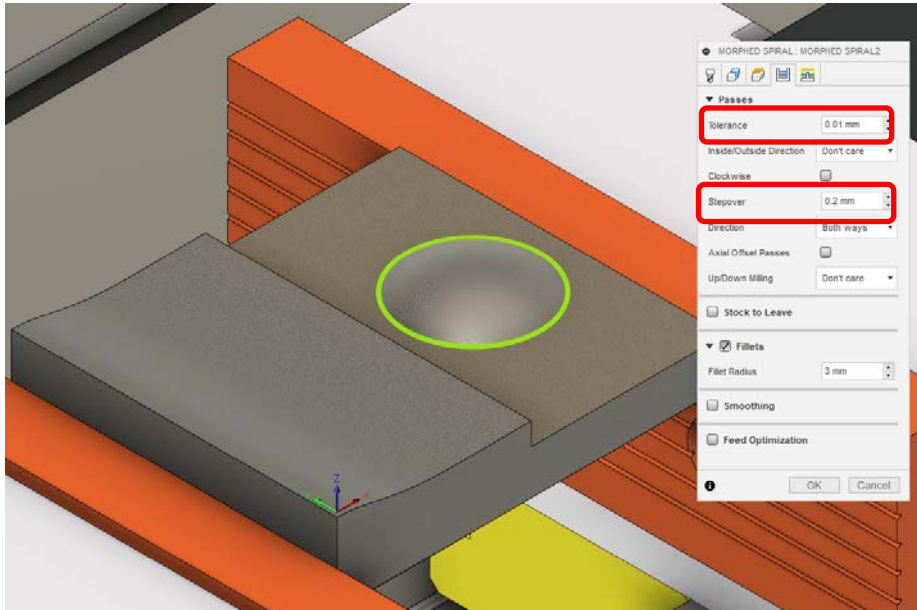


Figura 136. Elección trayectoria Morphed Spiral

Se deja elegir al programa la mejor trayectoria y se observan los resultados en la siguiente figura.

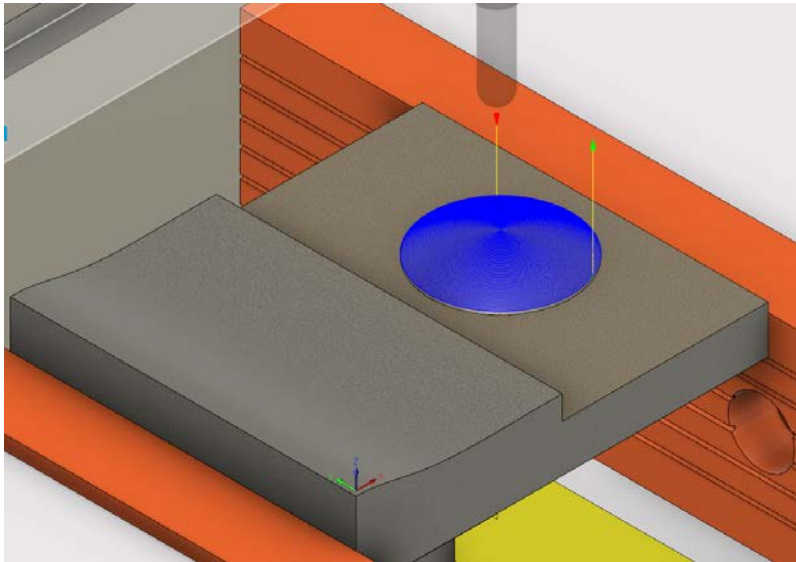


Figura 137. Elección trayectoria Morphed Spiral

Desde la simulación se puede observar el recorrido de la herramienta que partiendo desde el centro de la superficie esférica va acabando la superficie esférica en un tiempo de 19:07 minutos.

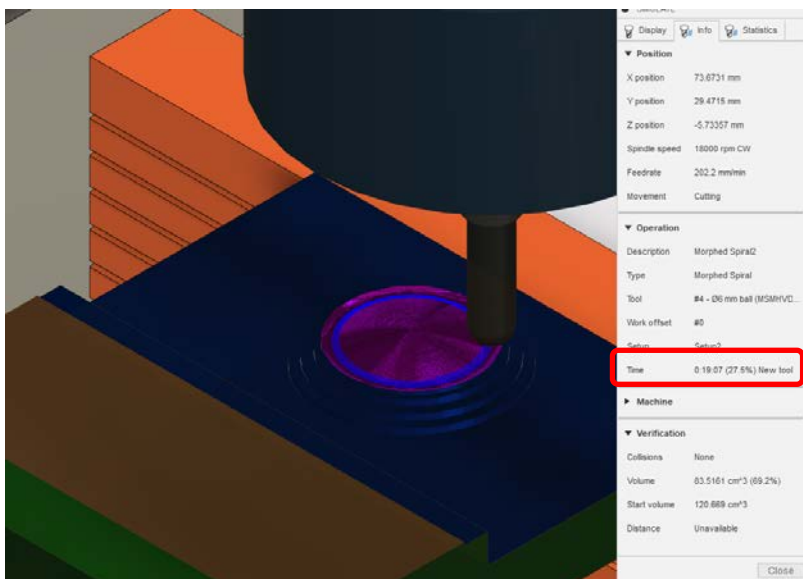


Figura 138. Simulación estrategia Morphed Spiral sobre superficie esférica

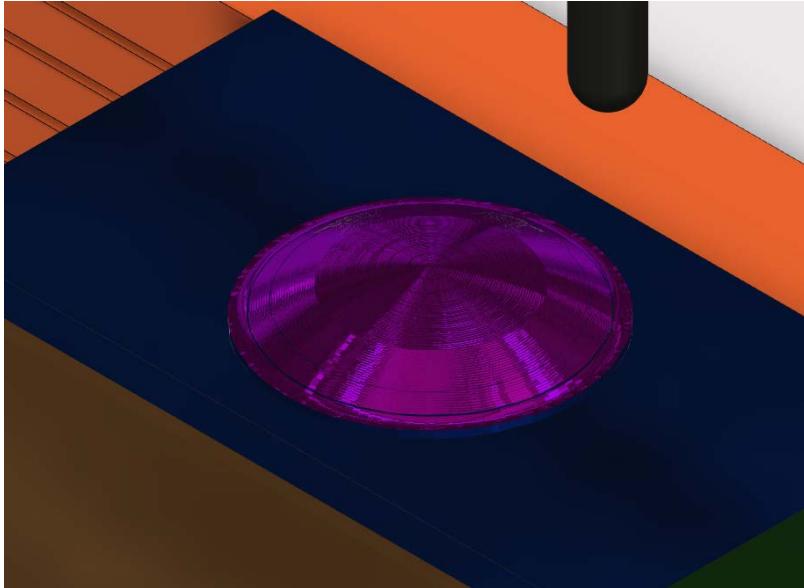


Figura 139. Simulación mecanizado superficie esférica Morphed Spiral

-Operación 4: Radial, igual que la estrategia de espiral, esta operación también empieza desde un punto central proporcionando la capacidad de mecanizar piezas radiales. También proporciona la opción de detenerse antes del centro cuando las pasadas radiales. El punto central del detalle a mecanizar se coloca automáticamente, o pueden ser especificados por el usuario.

Se selecciona la superficie en la cual se quiere aplicar la estrategia radial y se establece la tolerancia en 0,01mm como se puede ver en la figura.

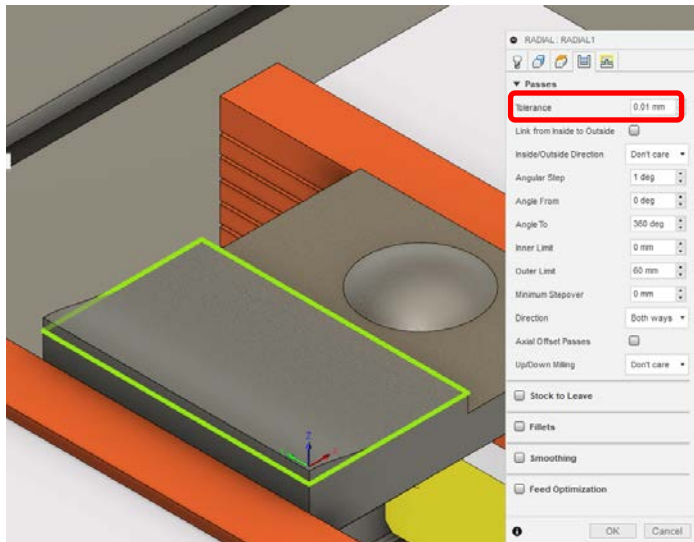


Figura 140. Estrategia Radial para el acabado de la superficie cóncava

Con la estrategia radial, la trayectoria parte desde un punto elegido automáticamente o escogido por el usuario y se extiende por toda la superficie como se puede ver en la siguiente figura

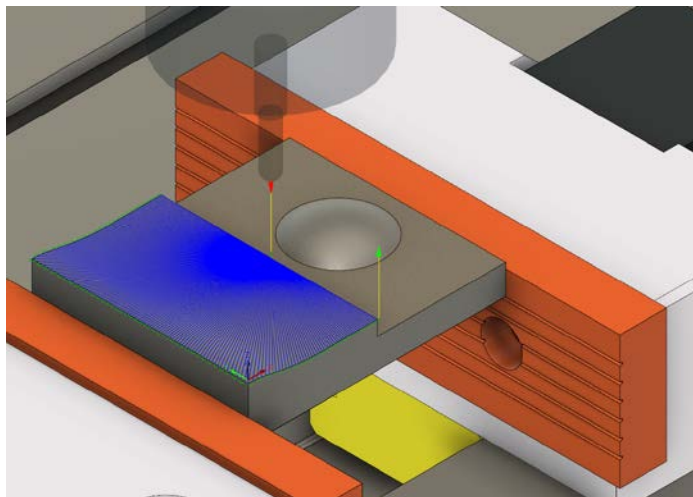


Figura 141. Trayectoria de la estrategia radial

Se puede observar que la trayectoria no presenta colisiones y parece una buena solución para el acabado de superficies cóncavas.

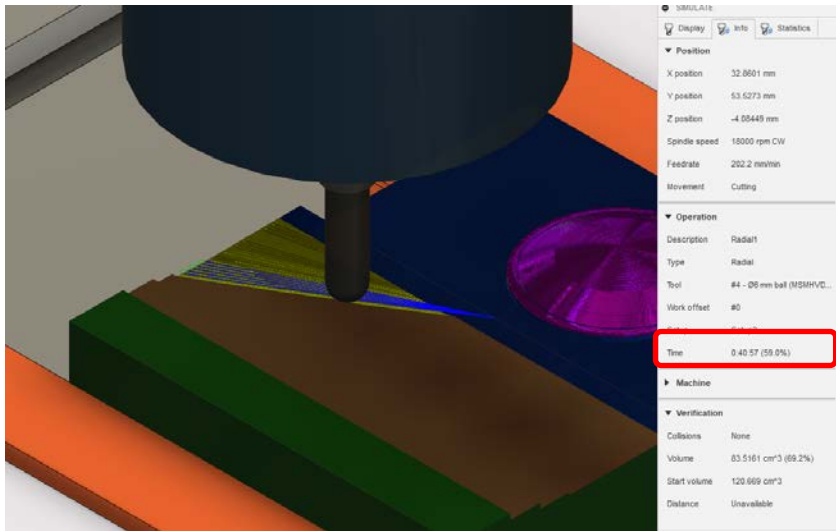


Figura 142. Tiempo de mecanizado estrategia radial

Esta estrategia de mecanizado se termina en 40:57 minutos sin colisiones de la herramienta.

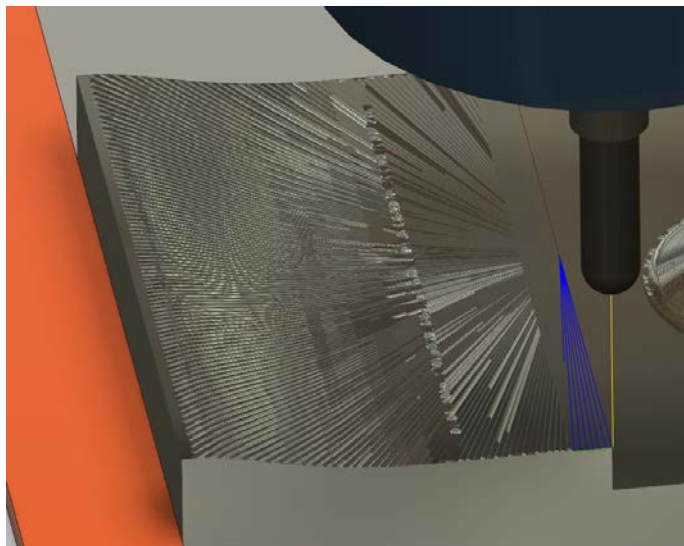


Figura 143. Acabado estrategia radial

- Tiempo maquina Test.2

Para el último ensayo el tiempo maquina total que se puede observar en el software de mecanizado es de 1:09:28 minutos.

Este ensayo es el que más tiempo maquina requiere para la mecanizar la pieza.

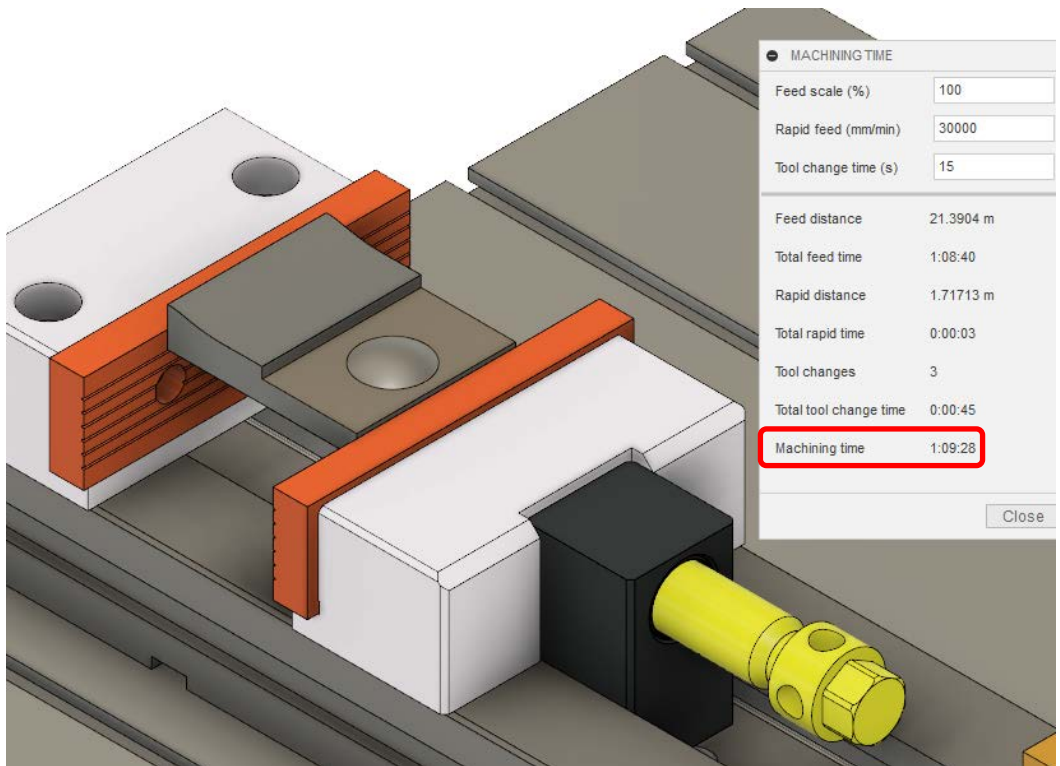


Figura 144. Tiempo maquina Test.3

Una vez obtenidos los tiempos maquinas desde el programa Fusion 360 se puede calcular el presupuesto incluyendo estos tiempos en los co0stes considerando como tiempo maquina el tiempo del primer Test

Capítulo 5 CONCLUSIONES

Gracias al Trabajo fin de Master “Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes de fabricación sostenible” se han podido integrar los conocimientos del Master Universitario en Ingeniería Mecánica de forma práctica e investigar en el campo del mecanizado de superficies complejas. En este proyecto se ven reflejadas áreas como la selección de materiales, las técnicas de diseño para fabricación en sus distintas fases de CAD y CAM y también está presente la gestión de proyectos.

Con la ayuda de diferentes herramientas para la fabricación asistida por ordenador y la generación del código máquina se ha realizado el proceso de mecanizado de una pieza que presenta superficies complejas. Para poder actuar con este proceso de mecanizado primero se ha tenido que investigar teóricamente sobre esta técnica de conformado para luego practicar con esas herramientas de diseño que ayudan en la etapa de planificación de los procesos de fabricación del producto.

Una vez estudiado el marco teórico y el caso práctico, se diseñó y se fabricó exitosamente una pieza experimental caracterizada por presentar superficies complejas. Se planificó el proceso de fabricación por mecanizado usando el proceso de fresado con herramientas planas y de punta esférica en un centro de maquinado vertical de tres ejes y se ejecutaron los cálculos de corte para poder configurar todas las funcionalidades de la aplicación CAM y poder generar el código máquina.

Para la planificación, simulación y verificación del proceso se desarrolló un modelo virtual de la mesa de trabajo sobre el cual se implementó el montaje virtual del sistema de manufactura con el que se verificó y se ajustó el proceso hasta observar un buen desempeño. Se comprobaron así las ventajas de utilizar los recientes métodos virtuales ofrecidos por varios sistemas de maquinado asistido por computador para la simulación del proceso, especialmente cuando se trata de componentes complejos procesados en máquinas herramienta de más de tres ejes.

Muy importante durante el desarrollo de proyectos es conocer bien las aplicaciones que se van a emplear. Con respecto al Fusión 360 se ha seguido un proceso de

formación previa y se han hecho pruebas modelando una pieza para poder lograr el conocimiento fundamental de la herramienta. Esto ha demostrado que un ingeniero mecánico debe saber utilizar los softwares más comunes en el mercado y adaptarse a los cambios y actualizaciones de estos.

Se puede decir en definitiva que el desarrollo de este trabajo permitió adquirir competencias en el área del mecanizado integrando los conocimientos adquiridos durante el año de Master Universitario en Ingeniería Mecánica.

Capítulo 6 TRABAJOS FUTUROS

Con este Trabajo Fin de Master se ha analizado el mecanizado y profundizado el estudio de la herramienta software Fusión 360 utilizado en el área de Ingeniería de Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, por lo tanto, este documento podrá servir como guía en futuros trabajos y estudios sobre el mecanizado y sobre las herramientas de modelado y simulación de la marca Autodesk.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFIA

1. Principios de Mecanizado y Planificación de procesos
http://www.dimf.upct.es/personal/EA_M/Principios%20de%20mecanizado.pdf
2. Diseño y fabricación de un producto en un centro de mecanizado de alta velocidad en 5 ejes
[file:///D:/Downloads/TFM_Antonio%20Jos%C3%A9%20P%C3%A1ez%20Castillo%20\(1\).pdf](file:///D:/Downloads/TFM_Antonio%20Jos%C3%A9%20P%C3%A1ez%20Castillo%20(1).pdf)
3. Mecanica del corte http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/14.pdf
4. Fundamentos de corte https://www.u-cursos.cl/usuario/60a9bfeb0c721f171093788d3f007555/mi_blog/r/Capitulo_20.pdf
5. Machining of complex sculptured surfaces.
6. Groover MP (2011) Principles of modern manufacturing, 4th edn. Wiley, New Delhi.
7. Tlusty G (2000) Manufacturing processes and equipment. Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River.
8. Multi-functional milling cutter for high speed & performance machining of aluminum and titanium alloys (Tools news)
9. <http://grupocarman.com/blog/como-funciona-el-cnc/>
10. <https://www.ssab.es/products/brands/toolox/products/toolox-44>
11. https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/surface_generation/pages/default.aspx
12. 602-es-Toolox_Machining_Rec_V2-2016-Halledo.pdf
13. https://www.metalia.es/data/empresas/Toolox/pdf/044_Datasheet_Toolox_44_ES.pdf
14. Nontraditional machining processes. <http://www.mechse.illinois.edu>
15. Elektrochemische Metallbearbeitung (ECM). <http://www.gfac.com/EMAG>
16. MicroEDMing medical parts (2005) American Machinist
17. <http://kuzudecoletaje.es/tipos-de-mecanizados/>

18. <https://www.monografias.com/trabajos104/mecanizado-fundamentos-y-herramientas/mecanizado-fundamentos-y-herramientas.shtml>

INDICE FIGURAS

Figura 1. Torno con pedal y rueda	20
Figura 2. Primer torno de gran precisión	20
Figura 3. Centro de mecanizado moderno	21
Figura 4. Movimientos de corte	22
Figura 5. Velocidades y profundidad de corte	23
Figura 6. Ángulo de corte	23
Figura 7. Herramientas de corte	25
Figura 8. Herramientas sin mango	26
Figura 9. Fresa esférica	27
Figura 10. Fresa tórica	27
Figura 11. Fresa plana	27
Figura 12. Fresa ranurar	27
Figura 13. Fresa cónica	27
Figura 14. Fresa angular	28
Figura 15. Broca	28
Figura 16. Mandril	28
Figura 17. Escariador	29
Figura 18. Porcentaje materiales de herramientas	30
Figura 19. Taladro	31
Figura 20. Limadora	32
Figura 21. Mortajadora	32
Figura 22. Cepilladora	32
Figura 23. Torno	32
Figura 24. Fresadora	33
Figura 25. Centro de mecanizado moderno CNC	33
Figura 26. Interpolación continua en 5 ejes simultáneos	34
Figura 27. Fuerzas y vibraciones que actúan sobre las maquinas herramientas	34
Figura 28. Orientación y rigidez de la herramienta	37
Figura 29. Desgaste de la herramienta	38
Figura 30. Impulsor	40
Figura 31. Introdutores	40
Figura 32. Ventiladores	41
Figura 33. Colisiones posibles durante el mecanizado	43
Figura 34. El concepto de superficie de mecanizado	44

Figura 35. Ejemplo de trayectoria de fresado de flanco-----	45
Figura 36. Trayectorias de fresado por inmersión: a ejemplo de tool-path, b superficies mecanizadas. Trayectoria trocoidal -----	46
Figura 37. Ejemplo de curvas de guía para fresado de bolsillo trocoidal -----	46
Figura 38. Ejemplo de orientación de los ejes de una máquina herramienta-----	46
Figura 39. Elección de diferentes trayectorias de mecanizado-----	50
Figura 40. Tipologías de trayectorias y acercamientos a la pieza -----	51
Figura 41. Proceso de fabricación -----	54
Figura 42. Geometría pieza elegida para el estudio-----	54
Figura 43. Categoría metales-----	56
Figura 44. Fresa plana -----	57
Figura 45. Centro de mecanizado GT-66V -----	58
Figura 46. Estructura y dimensiones de trabajo GT-66V -----	58
Figura 47. Fresa de planeado -----	60
Figura 48. Velocidad de corte aconsejada para el fabricante de la fresa -----	61
Figura 49. Profundidad de corte aconsejada para el fabricante de la fresa -----	61
Figura 50. Fresa de plana 8mm-----	62
Figura 51. Velocidad de corte aconsejada por el fabricante -----	62
Figura 52. Fresa esférica -----	63
Figura 53. Características dimensionales fresa esférica-----	63
Figura 54. Velocidad y profundidad de corte aconsejada.-----	64
Figura 55. Medidas herramienta de corte. -----	64
Figura 56. Avance y numero de dientes.-----	65
Figura 57. Profundidad y anchura de corte.-----	65
Figura 58. Potencia neta, par y fuerza de corte. -----	66
Figura 59. Fresado en concordancia.-----	66
Figura 60. Fresado en contraposición.-----	67
Figura 61. Posición de corte.-----	67
Figura 62. Contacto filo pieza.-----	68
Figura 63. Posición de corte.-----	68
Figura 64. Datos de corte fresa esférica.-----	68
Figura 65. Velocidad de corte para haceros endurecidos herramienta Mitsubishi.---	69
Figura 66. Especificaciones técnicas Toolox44.-----	70
Figura 67. Fuerza especifica de corte Kc. -----	72
Figura 68. Velocidad de corte aconsejada por el fabricante. -----	73
Figura 69. Fuerza especifica de corte Kc. -----	74
Figura 70. Velocidad de corte real.-----	76

Figura 71. Set up mecanizado -----	77
Figura 72. Selección de las herramientas -----	77
Figura 73. Herramientas de Fusion 360 -----	78
Figura 74. Creación nueva carpeta de herramientas Mitsubishi -----	78
Figura 75. New Mill Tool -----	79
Figura 76. Ventana de configuración herramientas en Fusión 360-----	79
Figura 77. Base de datos herramientas Mitsubishi-----	80
Figura 78. Configuración fresa plana Mitsubishi -----	80
Figura 79. Configuración fresa 63mm de diámetro Mitsubishi-----	80
Figura 80. Creación carpeta herramientas Mitsubishi -----	81
Figura 81. Geometría pieza prueba pre-test. -----	82
Figura 82. Pieza base y geometría ultima. -----	83
Figura 83. Pieza montada en el espacio de trabajo.-----	83
Figura 84. Preparación máquina y espacio de trabajo. -----	84
Figura 85. Fresa toroidal de plaquetas para altas velocidades. -----	85
Figura 86. configuración y trayectoria de desbaste. -----	86
Figura 87. Operación de desbaste, tiempos y colisiones. -----	87
Figura 88. Operación de desbaste con Stepover 35mm.-----	88
Figura 89. Fresa plana de plaquetas marca Mitsubishi. -----	89
Figura 90. Datos de partida para el mecanizado adaptativo. -----	90
Figura 91. Detalle trayectoria escogida en automático por el programa -----	90
Figura 92. Detalle acabado trayectoria escogida por el programa. -----	90
Figura 93. Definición de trayectorias modificada por el usuario. -----	91
Figura 94. Detalle trayectoria con la opción Machine Shallow Areas seleccionada. --	92
Figura 95. Detalle acabado con Machine Shallow Areas seleccionada.-----	92
Figura 96. Fresa punta esférica de plaquetas marca Mitsubishi. -----	93
Figura 97. Detalle trayectoria con la operación de contornado con fresa esférica.--	93
Figura 98. Detalle acabado superficial con fresa esférica.-----	94
Figura 99. Detalle variación impostaciones de pasada. -----	95
Figura 100. Detalle variación impostaciones de pasada.-----	95
Figura 101. Modelo pieza a mecanizar -----	96
Figura 102. Barra de Toolox44 de dimensiones 100x60x60mm-----	97
Figura 103. Modelo pieza montada en mesa GT-66V.-----	97
Figura 104. Tabla medidas barras de Toolox 44-----	99
Figura 105. Definición del Setup -----	100
Figura 106. Datasheet fresa toroidal plana-----	100
Figura 107. Trayectoria para el planeado-----	101

Figura 108. Operación de desbaste -----	102
Figura 109. Datasheet fresa plana 8mm -----	103
Figura 110. Selección del área de trabajo-----	104
Figura 111. Trayectoria generada para la operación de Pocket-----	104
Figura 112. Desbaste con fresa plana-----	105
Figura 113. Setup de la tercera operación-----	106
Figura 114. Trayectorias 3 Operación-----	106
Figura 115. Trayectorias 3 Operación-----	107
Figura 116. Datasheet fresa esférica Mitsubishi -----	108
Figura 117. Avance por vuelta -----	109
Figura 118. Estrategia de fresado esférico -----	109
Figura 119. Trayectoria de acabado superficial -----	110
Figura 120. Simulación fresada con punta esférica-----	110
Figura 121. Superficie esférica acabada-----	111
Figura 122. Impostación ultima pasada de acabado superficial-----	112
Figura 123. Trayectoria generada para la operación de fresado paralelo -----	112
Figura 124. Tiempo de proceso -----	113
Figura 125. Proceso fresado paralelo terminado -----	113
Figura 126. Tiempo maquina Test.1-----	114
Figura 127. Proceso fresado Scallops -----	115
Figura 128. Proceso fresado Scallops -----	116
Figura 129. Trayectorias proceso Scallop -----	116
Figura 130. Trayectorias proceso Scallop -----	117
Figura 131. Acabado superficial proceso Scallop -----	117
Figura 132. Estrategia Morphed Spiral -----	118
Figura 133. Trayectoria Morphed Spiral -----	118
Figura 134. Simulación trayectoria Morphed Spiral-----	119
Figura 135. Tiempo maquina Test.2-----	120
Figura 136. Elección trayectoria Morphed Spiral -----	121
Figura 137. Elección trayectoria Morphed Spiral -----	122
Figura 138. Simulación estrategia Morphed Spiral sobre superficie esférica -----	122
Figura 139. Simulación mecanizado superficie esferica Morphed Spiral -----	123
Figura 140. Estrategia Radial para el acabado de la superficie cóncava -----	124
Figura 141. Trayectoria de la estrategia radial -----	124
Figura 142. Tiempo de mecanizado estrategia radial-----	125
Figura 143. Acabado estrategia radial-----	125
Figura 144. Tiempo maquina Test.3-----	126

Figura 145. Tabla precios Toolox 44 en euro-----	156
Figura 146. Estudio y viabilidad del Proyecto-----	156
Figura 147. Determinación de soluciones diseño y selección de herramientas-----	157
Figura 148. Determinación de soluciones diseño y selección de herramientas-----	158

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



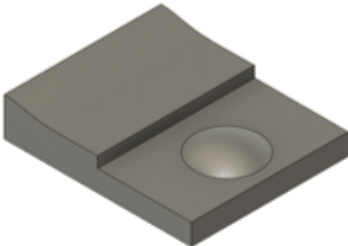
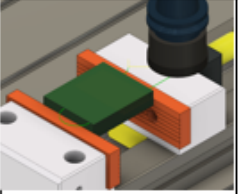
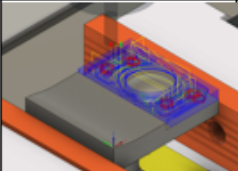
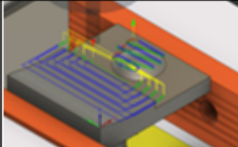
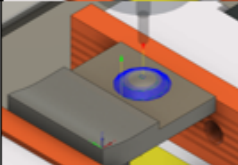
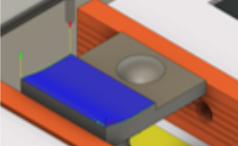
Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

ANEXOS

Presentado por: D. Salvatore Alessandro Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor

Valencia, septiembre de 2018

HOJA DE PROCESOS								
MATERIAL	DIMENSION BRUTO	MAQUINA	MECANIZADO			TIEMPO TOTAL		
Toloox 44	87x73x20	Gentiger GT-66V						
								
FASE	OPERACIÓN	CROQUIS	HERRAMIENTA	V. DE GIRO (rpm)	V. DE AVANCE (mm/min)	PROF. RADIAL (mm)	PROF. AXIAL (mm)	TIEMPO
1	PLANEADO		Fresa de plaquitas ϕ 35mm	758	341	42	1	1:43
2	DESBASTE		Fresa plana ϕ 8mm	6000	1680	7,5	1	0:06:08
3	DESBASTE		Fresa plana ϕ 8mm	6000	1680	7,6	1	0:01:46
4	ACABADO		Fresa esferica ϕ 6mm	1011	202	-	-	0:08:56
5	ACABADO		Fresa esferica ϕ 6mm	1011	202	-	-	00:31:52

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

PLIEGO DE CONDICIONES

Presentado por: D. Salvatore Alessandro Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor


Valencia, septiembre de 2018

Pliego de especificaciones técnicas:

1- Especificaciones de materiales y equipos:

Material

El material utilizado para la modelación de la pieza de este trabajo es el Toolox44. Se añade ficha técnica.



Información técnica

Toolox® 44

Uso

El Toolox 44 es un nuevo acero que se suministra templado y revenido. Posee una gran tenacidad a los impactos y sus tensiones residuales son muy bajas, a fin de proporcionar una buena estabilidad dimensional. A pesar de su dureza, que asciende a 45 HRC, el Toolox 44 es fácil de mecanizar.

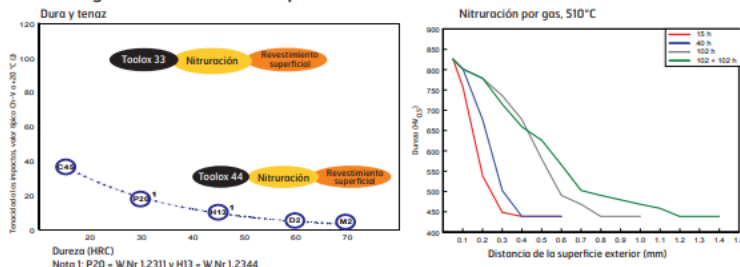
El Toolox 44 posee alta resistencia a temperaturas elevadas y es apropiado para estampas y herramientas de moldeado de plástico y goma, y para colada por presión, así como para herramientas de doblar y conformar chapa. Asimismo, es muy apto para componentes de máquinas, como piezas sometidas a desgaste, ralles de guía, aplicaciones de alta temperatura.

Valores típicos

COMPOSICIÓN QUÍMICA		PROPIEDADES MECÁNICAS					
C	0.32%		+20 °C	+200 °C	+300 °C	+400 °C	+500 °C
Si	0.6-1.1%	Resistencia a la tracción, R _m [MPa]	1450	1380			
Mn	0.8%	Límite de elasticidad, R _{e0.2} [MPa]	1300	1200			
P	max 0.010%	Elongación, A ₅ [%]	13	10			
S	max 0.003%	Límite de resistencia a la compresión, R _{p0.2} [MPa]	1250	1120	1120	1060	930
Cr	1.35%	- después de 170 h de tiempo de homogeneización				1060	910
Mo	0.80%	Resistencia al impacto, [J]	30	60	80	80	
V	0.14%	Dureza, [HBW]	450				
Ni	max 1%	Dureza, [HRC]	45				
CE _{II} (W)	0.92-0.96						
CET	0.55-0.57						

INCLUSIONES		PROPIEDADES FÍSICAS			
Tamaño (diám. equiv.)	6 µm	+20 °C	+200 °C	+400 °C	
Fracción de área	0.015%	Conductividad térmica [W/m • K]	34	32	31
Relación de aspecto	1,2	Coefficiente de dilatación térmica [10 ⁻⁶ /K]	13.5	13.5	13.5

Tecnología de tratamiento superficial



SSAB, SE-613 80 Oxelösund, Suecia. Tel +46 155 25 40 00 Fax +46 155 25 55 34

www.toolox.com



TOOLOX®
PREHARDENED TOOL STEEL

Mecanizado Toolox® 44

Toolox 44 se puede trabajar en máquinas estables convencionales. Es importante utilizar plaquitas con un ángulo de corte positivo y evitando las vibraciones. Utilice las siguientes recomendaciones como directrices y punto de partida para evaluar sus mejores prácticas.

Fresado

Plaquita de metal duro cementado ISO clase P 20

El ángulo de corte debe ser siempre positivo

Velocidad de corte $V_c = 100-150$ m/min

Avance $f = 0.10-0.15$ mm/diente

Velocidad (vrt/min) $n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$

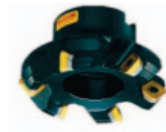


Desbaste

Utilice platos con plaquitas circulares

Acabado

Utilice fresas con un ángulo de posición de 45°



Taladrado

Brocas de carburo

Velocidad de corte

$V_c = 30-40$ m/min

$f = 0.10-0.15$ mm/vuelta

La penetración (f) y la velocidad

(rpm) (n) dependen del diámetro

D de la broca

Utilice refrigerante



Acero rapido HSS-Co

Velocidad de corte $V_c = 6-8$ m/min

Velocidad (rpm)

$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$

Utilice refrigerante



D [mm]	PENETRACIÓN f[mm/rev]
5	0.05
10	0.09
15	0.15
20	0.20
25	0.25
30	0.30

Roscado

Fresadora de roscar

Velocidad de corte $V_c = 30$ m/min

Penetración (f) = 0.03 mm/diente



Rosca HSS-Co

Velocidad de corte

$V_c = 2.5-4$ m/min



DIMENSIONES	VELOCIDAD
M6	160
M8	120
M10	95
M12	80
M16	60
M20	50

Oxicorte/Soldadura

Temperatura de trabajo recomendada para oxicorte y soldadura.

Min. 250 °C

Temperatura para eliminación de tensiones recomendada después de oxicorte

y soldadura (enfriamiento posterior lento a temperatura ambiente).

580 °C

Para información más detallada vea Best Practice, o póngase en contacto con SSAB Plate.

Este documento es una herramienta de apoyo. En www.ssab.com/publications puede descargar la versión más reciente. Esta hoja debe contener sugerencias e información de carácter general sin ninguna garantía de exactitud o tipo de ganancia. Para los eventos, SSAB Oxyburned AB no asumirá ninguna responsabilidad de daños, incluyendo daños, en relación con el uso de la información y de su aplicación en situaciones individuales. Recomiendamos la reproducción del usuario de este sitio web para sus requisitos de cada aplicación individual.

Máquina herramienta

La máquina herramienta utilizada en el laboratorio de mecanizado del Departamento de Ingeniería mecánica y Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia es un centro de control de 3 ejes más uno añadido de la marca Gentiger modelo GT 66V.

Se adjuntan especificaciones técnicas y dimensionales.



Double Column High Speed Machine Structure High Speed! Stable! Rigid!

Max. table load 400 kg
(Average load)

Allowable Workpiece Dimensions:

Optimal Machine Structure
Specially designed T shape machine structure features superior rigidity. The width of column is the same as the base. The table is independently installed on base, and fully supported through the entire stroke, assuring maximum accuracy and dependability. Long term accuracy at high speed machining is assured.

Lifetime Accuracy
All castings are stress relieved and seasoning treated for long term accuracy and long service life.

Three Axes Ball Screws

- Roller type linear guideways on three axes feature higher feedrate, resist heavier loads, ensure superior dynamic accuracy and a long service life.
- High acceleration speed on 3 axes, X-axis 0.8G, Y-axis 0.9G, and Z-axis 1.0G. This outstanding design greatly reduces machining time while upgrading economical efficiency.
- 3 axes feedrate: Rapid feedrate 30 m/min, Cutting feedrate 20 m/min.
- Positioning accuracy: 0.005 mm / Full Stroke. (ISO-230-2)
- Repeatability accuracy: <0.004 mm / Full Stroke. (ISO-230-2)
- Cutter balance should be calibrated to within G2.5

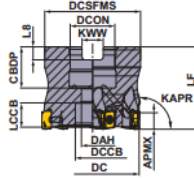
MODEL	T15	S24	S36
Max. spindle speeds	15,000 rpm	24,000 rpm	36,000 rpm
Spindle taper	BT-40/BBT-40	HSK-A63	HSK-E50
Spindle motor	11 kw	30/39 kw	20/24 kw
Inner Dia. of spindle bearing	Ø70 mm	Ø65 mm	Ø50 mm
Bearing lubrication	Grease / Oil-air (opt.)	Oil-Air	Oil-Air
Spindle cooling	Oil-cooling	Water-cooling	Water-cooling
Distance from spindle center to machine front	750 mm		
Table area	750 x 500 mm		
T-slot	18 x 5 x 100 mm		
Height of table from ground	800 mm		
Max. load of table (Average load)	400 kg		
Travel for X, Y, Z-axes	720 x 500 x 400mm		
Distance from table surface to spindle nose	150~550 mm		
Rapid feedrate	30 m/min		
Cutting feedrate	20 m/min		
Magazine capacity	16		
Max. tool length	250 mm		
Max. tool weight	5 kg		
Motor of tool magazine	60 W		
Max. Tool diameter	Ø80 mm		
X, Y & Z axis servomotors	X: 6.3 kw / Y: 5 kw / Z: 5kw		
Air pressure requirement	7 kgf/cm2		
Air conditioner	750 / 550 W		
Spindle cooler	1950 W	2650 W	2650 W
Automatic lubricator (Slideways)	150 W		
Coolant motor	750 W		
Total power consumption (Max.)	40 KVA	45 KVA	45 KVA
Coolant tank	250 liter		
Packing dimensions (L x W x H)	3200 x 2140 x 2550 mm / 870 x 700 x 1560 mm		

Herramientas

Las herramientas Empleadas para el mecanizado son de la marca Mitsubishi.
Se adjunta hoja de herramientas con ficha técnica de cada y una.

CÓDIGO	HERRAMIENTA								PLAQUITA	
	DIÁMETRO	FILOS	LONGITUD	D tornillo	Peso	prof Corte	Max Rev	Plaquetas	Plaquetas Montada	
	DC	No.T	LF	DCON	WT	APMX	RMPX	Max spndle		
		mm	mm	mm	kg	mm				
VPX300-063A06AR	63	6	40	22	0,61	11	0,60°	13.400	LOGU12	LOGU1207080PNER-M
MSMHVD0800E	8	4	60	8		19		6000		
SRFH10512M	10	1	110	12		13		6369	SRBT10	

- Fresa plana de plaquetas



Right hand tool holder only.

DC	Set Bolt	Geometry
φ40	HSC08025H	
φ50, φ63	HSC10030H	
φ80	HSC12035H	

Arbor Type

With Coolant Hole

GAMP: -6° T: +5°
GAMF: -22.5° I: +5°

DC=mm size, DCON=mm size, DCON=inch size

(mm)

DC	Order Number	Stock	No.T	LF	DCON	WT (kg)	APMX	RMPX	Max. Spindle Speed (min ⁻¹)	
		R								Insert Type
40	VPX300-040A03AR	●	3	40	16	0.21	11	1.06°	17900	LOGU12
40	VPX300-040A04AR	●	4	40	16	0.21	11	1.06°	17900	LOGU12
50	VPX300-050A04AR	●	4	40	22	0.34	11	0.79°	15500	LOGU12
50	VPX300-050A06AR	●	6	40	22	0.33	11	0.79°	15500	LOGU12
63	VPX300-063A06AR	●	6	40	22	0.61	11	0.60°	13400	LOGU12
63	VPX300-063A08AR	●	8	40	22	0.62	11	0.60°	13400	LOGU12

VPX300

RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

CUTTING SPEED/ WET CUTTING

Work Material	Properties	Cutting Conditions	Insert		ae			
			Grade	Chip Breaker	<0.25 DC	0.25-0.5 DC	0.5-0.75 DC	1.0 DC
					Vc (m/min)			
Mild Steel	<180HB	● ●	MP6120	M	140 [100-190]	130 [90-180]	100 [70-120]	100 [70-120]
			VP15TF	M	140 [100-190]	130 [90-180]	100 [70-120]	100 [70-120]
			MP6130	M	140 [100-190]	130 [90-180]	100 [70-120]	100 [70-120]
Carbon Steel Alloy Steel Alloy Tool Steel	180-350HB <350HB	● ●	MP6120	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
			VP15TF	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
			MP6130	M	120 [90-140]	110 [80-130]	100 [70-120]	100 [70-120]
Pre-hardened Steel	35-45HRC	● ●	MP6120	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]
			VP15TF	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]
			MP6130	M	100 [80-120]	90 [70-110]	80 [60-100]	80 [60-100]

DEPTH OF CUT / FEED PER TOOTH

Work Material	Properties	ae	Cutting Conditions	DC			
				Ø25		Ø28-Ø80	
			ap	fz (mm/t.)	ap	fz (mm/t.)	
Mild Steel	<180HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.2	<11	0.1-0.3
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.08-0.12	<8	0.1-0.2
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.15
Carbon Steel	180-280HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.2	<11	0.1-0.3
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.08-0.12	<8	0.1-0.2
Alloy Steel		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.15
Alloy Tool Steel		<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12
Carbon Steel	280-350HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
Alloy Steel		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12
Alloy Tool Steel	<350HB	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12
Pre-hardened Steel	35-45HRC	<0.25 DC	● ● *	<11	0.1-0.15	<11	0.1-0.25
		0.25-0.5 DC	● ● *	<11	0.08-0.12	<11	0.1-0.2
		0.5-0.75 DC	● ● *	<8	0.06-0.1	<8	0.1-0.15
		1.0 DC	● ● *	<5	0.06-0.1	<5	0.08-0.12

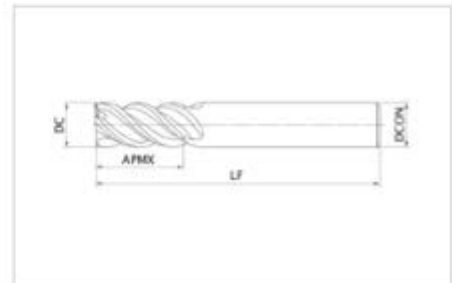
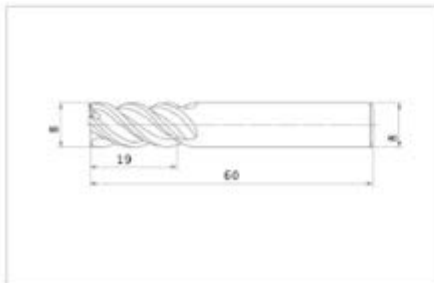
- Fresa plana enteriza

MSMHVD0800E

Product Information



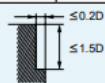
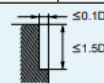
Diameter (Unit)	
Stock	●
Unit of Length	M
DC	8
DCON	8
LF	60
APMX	19
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	4
Max. Cutting EdgeDiameter Tolerance	0
Min. Cutting EdgeDiameter Tolerance	-0.02
Coated	MS



RECOMMENDED CUTTING CONDITIONS

Shoulder milling

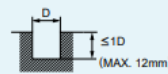
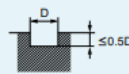
Dia. (mm)	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (-30HRC) Cf53, GG25		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (-45HRC)		Stainless steel (-1100N/mm ²)	
	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)
6	9000	2240	8000	2240	5300	1060
8	7000	1680	6000	1680	4000	960
1.0	5000	1440	4800	1440	3200	770
1.2	4000	1200	4000	1200	2700	760
1.6	3000	1140	3000	1140	2000	560
2.0	2400	860	2400	860	1600	510

Depth of cut				
	D: Dia.		D: Dia.	

D: Dia.

Slot milling

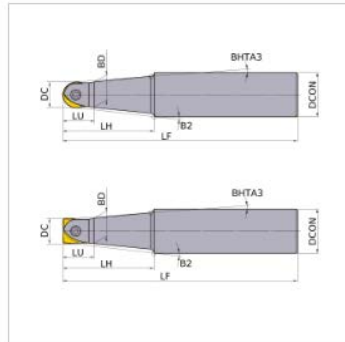
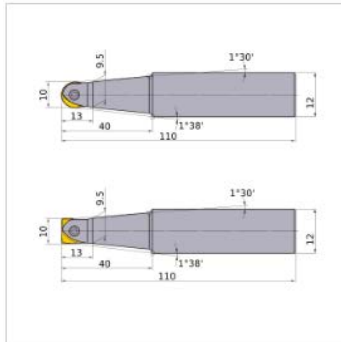
Dia. (mm)	Carbon steel, Cast iron, Alloy steel (-30HRC) Cf53, GG25		Alloy steel, Tool steel, Pre-hardened steel (-45HRC)		Stainless steel (-1100N/mm ²)	
	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)
6	6500	1280	4000	740	3700	440
8	5000	1150	3000	670	2800	340
1.0	4000	910	2500	530	2200	350
1.2	3500	900	2000	530	1900	300
1.6	2500	670	1500	390	1400	280
2.0	2000	610	1200	350	1100	260

Depth of cut				
	D: Dia.		D: Dia.	

- Fresa esférica

SRFH10S12M

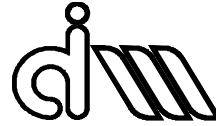
Product Information



Diameter (Unit)	
Hand	R
Stock	●
Unit of Length	M
DC	10
DCON	12
BD	9.5
B2	1°38'
BHTA3	1°30'
LF	110
LH	40
LU	13
Cutting item count: CICT	1
Peripheral effective cutting edge count: ZEFP	2

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

PRESUPUESTO

Presentado por: D. Salvatore Alessandro Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor

Valencia, septiembre de 2018

En este apartado se estudia el presupuesto donde se reflejan los costes totales, teniendo en cuenta los costes de materiales empleados para la realización, los costes humanos, sin tener en cuenta los costes de las licencias software y los costes de amortización de las máquinas.

Para la estimación del coste humano se considera el tiempo que un profesional dedicaría a cada tarea.

Hay que tener en cuenta para la estimación dos tipologías de costes:

- Costes directos, son un 5% del total y son esos costes de difícil cuantificación como por ejemplo la mano de obra, materiales, amortizaciones de las máquinas
- Costes indirectos son un 3% del total.

Se fijará en 60 €/h la mano de obra para los ingenieros, y en 50 €/h la mano de obra de los técnicos especialistas de mecanizado.

El tiempo para la fabricación de la pieza lo deducimos desde la simulación de cada operación del mecanizado de Fusion 360.

Se hará una estimación del coste del material utilizado para nuestra pieza. Teniendo en cuenta que el Toolox 44 se suministra en barras macizas de 500mm y la pieza se obtiene partiendo de un trozo de material bruto de dimensiones 87x73x20mm. Se puede ver desde el catálogo que el coste de una barra de dimensiones 73x20x500 es **74,87€**, fig.142. Entonces dividiendo 500mm por la longitud de nuestra pieza 87mm obtenemos el precio estimado para cada pieza de material bruto de Toolox44 en **5,75€**.

PREMIUM Toolox 44 - UNE Toolox 44
Eco-Práz - plano - 500 mm

Ancho	Espesor [mm]											
	4,3	5,3	6,3	8,3	10,3	12,3	15,3	20,3	25,3	30,3	40,3	50,3
33	39,75	40,98	41,32	41,71	43,75	45,80	49,54	53,12	58,03	64,24		
43	43,24	43,14	43,57	44,06	46,66	49,26	54,00	58,56	64,79	72,68	82,17	
53	45,42	45,29	45,82	46,41	49,57	52,72	58,47	64,00	71,56	81,12	92,64	105,37
63	47,60	47,45	48,07	48,76	52,47	56,18	62,94	69,43	78,32	89,56	103,10	118,07
73	49,78	49,61	50,32	51,12	55,38	59,64	67,41	74,87	85,08	98,00	113,56	130,76
83	51,96	51,76	52,57	53,47	58,28	63,10	71,88	80,31	91,85	106,45	124,03	143,46
93	54,14	53,92	54,81	55,82	61,19	66,56	76,35	85,75	98,61	114,89	134,49	156,16
103	56,32	56,08	57,07	58,17	64,10	70,02	80,82	91,18	105,38	123,33	144,95	168,85
123	68,36	67,78	68,84	70,00	77,00	83,86	96,89	110,94	127,14	146,61	170,00	198,24
143	81,08	80,41	81,66	83,01	91,00	98,86	113,87	130,00	148,64	170,49	198,80	238,24
163	94,44	93,67	95,02	96,47	105,00	113,82	130,00	148,47	170,49	198,80	238,24	288,80
183	108,36	107,49	108,94	110,49	119,00	128,82	148,64	170,49	198,80	238,24	288,80	349,60
203	122,84	121,87	123,42	125,07	134,00	144,82	165,00	186,47	210,49	240,80	289,60	349,60
223	137,96	136,89	138,54	140,29	149,00	160,82	183,00	206,47	232,49	263,80	314,60	375,60
243	153,68	152,51	154,26	156,01	165,00	177,82	202,00	227,47	258,49	291,80	344,60	411,60
263	170,04	168,77	170,62	172,57	181,00	195,82	222,00	249,47	282,49	321,80	371,60	448,60
283	187,12	185,75	187,70	189,75	198,00	213,82	242,00	270,47	304,49	345,80	404,60	481,60
303	204,84	203,37	205,42	207,57	216,00	232,82	262,00	291,47	332,49	376,80	436,60	514,60
323	223,24	221,67	223,82	226,07	234,00	251,82	282,00	313,47	354,49	401,80	461,60	544,60
343	242,36	240,69	242,94	245,29	253,00	272,82	304,00	336,47	380,49	429,80	486,60	574,60
353	262,12	260,35	262,72	265,27	273,00	294,82	328,00	362,47	412,49	463,80	519,60	604,60

Figura 145. Tabla precios Toolox 44 en euro

Se tendrá en cuenta también el precio de las herramientas empleadas, en nuestro caso herramientas de la marca Mitsubishi.

Nº Orden	Uds	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1.1		Reunión con el cliente			
1.1.1	h	Ingeniería	1	60	60 €
	%	Costes directos	5%		3 €
		Costes indirectos	3%		2 €
		Total			65 €
1.2		Búsqueda y estudio bibliografía referente al proyecto y normativa aplicable			
1.2.1	h	Ingeniería	7	420	420 €
	%	Costes directos	5%		21 €
	%	Costes indirectos	3%		13 €
		Total			454 €
1.3		Generación de los documentos de proyecto			
1.3.1	h	Ingeniería	25	1500	1.500 €
	%	Costes directos	5%		75 €
	%	Costes indirectos	3%		45 €
		Total			1.620 €

Figura 146. Estudio y viabilidad del Proyecto

Vamos a calcular el tiempo de fabricación para el Test 1:

$$T_n = \sum T_c + N_s \cdot T_s + T_r + T_h$$

Donde:

Tn = tiempo fabricación pieza

Tc = tiempo de corte

Ns = Número subfases

Ts = tiempo por maniobra para cambio de subfase

Tr = tiempo de reglaje de la máquina

Th = tiempo de cambio de herramienta

Se establece un tiempo de maniobra de Ts=0seg. No hay subfases en este proyecto, consiste de una sola fase; un tiempo de cambio de herramienta Th=15seg; y un tiempo de reglaje Tr = 10 min.

Se obtiene un tiempo de fabricación:

$$T_n = 59'24''$$

Nº Orden	Uds	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
2.1		Determinación soluciones			
2.1.1	h	Ingeniería	1	60	60 €
	%	Costes directos	5%		3 €
		Costes indirectos	3%		2 €
		Total			65 €
2.2		Elección de material			
2.2.1	h	Ingeniería	1	60	60 €
	%	Costes directos	5%		3 €
	%	Costes indirectos	3%		2 €
		Total			65 €
2.3		Diseño del modelo y generación programa de fabricación			
2.3.1	h	Ingeniería	6	360	360 €
	%	Costes directos	5%		18 €
	%	Costes indirectos	3%		11 €
		Total			389 €
2.4		Selección de herramientas y condiciones de corte			
2.4.1	h	Ingeniería	5	300	300 €
	%	Costes directos	5%		15 €
	%	Costes indirectos	3%		9 €
		Total			324 €

Figura 147. Determinación de soluciones diseño y selección de herramientas

Nº Orden	Uds	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
3.1		Pieza			
3.1.1	h	Fabricación de la pieza más técnico	1	50	50 €
3.1.2	Uds.	Face milling VPX300-063A06AR	1	208	208 €
3.1.3	Uds.	Flat milling MSMHVD0800E	1	23	23 €
3.1.4	Uds.	Ball end mill VF2SSBR0600 >15º	1	163	163€
3.1.5	Uds.	Plaquetas cuadradas	4	11	44 €
3.1.6	Uds.	Plaqueta cromo	1	30	30 €
3.1.7	%	Costes directos	5		25.9 €
3.1.8	%	Costes indirectos	3		15.54 €
			Total		559.44 €

Figura 148. Determinación de soluciones diseño y selección de herramientas

El presupuesto final será el resultado de la suma de los costes anteriormente estimados.

Nº Orden	Ud	Descripción	Rendimiento	Precio	Importe
1.1	Ud.	Reunión con el cliente	1	65 €	65 €
1.2	Ud.	Búsqueda y estudio bibliografía referente al proyecto y normativa aplicable	1	454 €	454 €
1.3	Ud.	Generación de los documentos de proyecto	1	1.620 €	1.620 €
Total apartado 1					2.139 €
2.1	Ud.	Determinación soluciones	1		65 €
2.2	Ud.	Elección de material	1		65 €
2.3	Ud.	Diseño del modelo y generación programa de fabricación	1		389 €
2.4	Ud.	Selección de herramientas y condiciones de corte	1		324 €
Total apartado 1					843 €
3.1		Pieza		Total apartado 1	559 €
Total					6.523 €

Para la estimación del presupuesto total se ha tenido en cuenta una serie de aspectos fundamentales. Hay que precisar que el precio total es una aproximación de lo que podría costar el estudio y producción de una pieza de este tipo.

El Coste final para el proyecto de estudio, cálculos y desarrollo de un plan de proceso para una pieza de este tipo asciende a un importe de seis mil quinientos veinte y tres euros.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica

Modelado, simulación y análisis de estrategias de mecanizado de superficies complejas orientadas al diseño de procedimientos para el cálculo de costes

PLANOS

Presentado por: D. Salvatore Alessandro Pappalardo
Dirigido por: Dr. D. Carlos Vila Pastor

Valencia, septiembre de 2018

