



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniera Mecánica**

**Estudio del mecanizado de un molde para  
soplado con Inventor CAM.**

**Autor:**

**Hernández Mateos, Alberto.**

**Tutor:**

**Delgado Urrecho, Javier.**

**CMIM/EGI/ICGF/IPF/IM Área de  
Ingeniería de los Procesos de Fabricación**

**Valladolid, febrero 2024.**





## RESUMEN

La programación de las estrategias de mecanizado asistidos por programas CAM, ha catapultado el desarrollo de la industria, permitiendo la creación de componentes de alta tecnología con una calidad muy superior y unos tiempos de diseño y producción mucho menores.

En este trabajo fin de grado, se pretende explicar de una manera profunda el procedimiento de programación en Inventor CAM del proceso de mecanizado de un molde de aluminio que se utilizará para la obtención de botellas por soplado de preformas, exponiendo detalles propios del software y las implicaciones que tienen las decisiones que, inevitablemente, se han de tomar en el desarrollo.

Para ello, se comenzará dando una visión general de la tecnología CAM, y una aproximación acerca de las fases previas y posteriores a la propia programación del fresado del molde, como son la selección del material del tocho de partida o la generación de un presupuesto básico.

## PALABRAS CLAVE

Inventor CAM, fresado, CNC, moldeo por soplado, preforma.



## ABSTRACT

The programming of machining strategies with the help of CAM softwares, has allowed industry to hugly improve, enabling the creation of moulds and high-tech parts with much higher quality and much shorter design and production times.

This final degree project aims to deeply explain the programming procedure in Inventor CAM of the machining process of an aluminium mould that will be used to obtain plastic parts by blowing preforms, explaining the details of this software and the implications of the decisions that inevitably have to be taken in the development.

In order to do this, giving an overview of CAM technology shall be the first step, followed by an approach to the prior and subsequent phases to the actual programming of the mould milling process, such as the selection of the starting billet material or the generation of a basic budget.

## KEYWORDS

Inventor CAM, milling, CNC, blow molding, preform.



# ÍNDICE DE CAPÍTULOS

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....   | 11 |
| 1.1. Introducción.....   | 11 |
| 1.2. Objetivos .....   | 12 |
| 2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....  | 13 |
| 3. VISIÓN GENERAL Y EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA CAM.....  | 14 |
| 4. PROCESO DE MOLDEO POR SOPLADO DE PREFORMAS .....  | 17 |
| 4.1. Procesos de moldeo más comunes.....   | 17 |
| 4.2. Moldeo por soplado de preformas.....  | 19 |
| 5. ENTORNO DE AUTODESK INVENTOR CAM .....  | 25 |
| 5.1. Interfaz de usuario .....   | 26 |
| 5.2. Procedimiento genérico de mecanizado .....  | 29 |
| 5.2.1. Creación de una fase .....  | 29 |
| 5.2.2. Biblioteca de herramientas .....  | 31 |
| 5.2.3. Programación de las operaciones de mecanizado.....  | 33 |
| 5.2.4. Verificación y postprocesado .....  | 36 |
| 6. MECANIZADO DE UN MOLDE DE ALUMINIO PARA CONFORMADO DE<br>BOTELLAS POR SOPLADO DE PREFORMAS..... | 41 |
| 6.1. Molde .....   | 41 |
| 6.1.1. Descripción de la geometría final objetivo .....  | 41 |
| 6.1.2. Tocho de partida .....  | 43 |
| 6.1.3. Creación de una fase .....  | 45 |
| 6.2. Selección de herramientas.....  | 48 |
| 6.3. Programación de las estrategias de mecanizado.....  | 54 |
| 6.3.1. Planeado de la cara de contacto .....   | 55 |
| 6.3.2. Taladrado de los alojamientos de los tetones .....  | 60 |
| 6.3.3. Desbaste pesado .....   | 65 |
| 6.3.4. Desbaste fino .....   | 70 |
| 6.3.5. Acabado de áreas con radio mínimo 4mm .....   | 73 |
| 6.3.6. Acabado de áreas con radio mínimo 3mm .....   | 76 |
| 6.3.7. Grabado de símbolos.....  | 80 |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| 6.4.     | Verificación del proceso y postprocesado ..... | 84 |
| 6.4.1.   | Simulación de las operaciones .....            | 84 |
| 6.4.2.   | Generación del código CNC.....                 | 85 |
| 7.       | CREACIÓN DE UN PRESUPUESTO.....                | 88 |
| 8.       | CONCLUSIONES .....                             | 91 |
| 8.1.     | Conclusiones académicas.....                   | 91 |
| 8.2.     | Conclusiones personales.....                   | 93 |
| 9.       | BIBLIOGRAFÍA.....                              | 95 |
| 9.1.     | Libros, artículos y trabajos.....              | 95 |
| 9.2.     | Bibliografía web.....                          | 95 |
| ANEXO I. | DATOS DE LAS HERRAMIENTAS .....                | 97 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Preformas típicas para la fabricación de botellas de plástico .....         | 20 |
| Figura 2: Proceso de extrusión-soplado paso a paso.....                               | 21 |
| Figura 3: Proceso de inyección-soplado paso a paso.....                               | 22 |
| Figura 4: Proceso de tensión-soplado .....  | 23 |
| Figura 5: Pantalla de inicio de Inventor.....   | 26 |
| Figura 6: Detalle de la parte superior de la pantalla de inicio.....                  | 27 |
| Figura 7: Pestaña "Modelo 3D" .....   | 27 |
| Figura 8: Pestaña "Boceto" .....  | 28 |
| Figura 9: Pestaña "CAM" .....   | 28 |
| Figura 10: Árboles de operaciones CAD y CAM.....                                      | 29 |
| Figura 11: Nueva configuración CAM .....  | 30 |
| Figura 12: Creación de una biblioteca de herramientas.....                            | 31 |
| Figura 13: Introducción de una nueva herramienta.....                                 | 32 |
| Figura 14: Biblioteca de herramienta completa .....                                   | 32 |
| Figura 15: Pestaña "herramienta" en la programación de una operación .....            | 33 |
| Figura 16: Pestaña "geometría" en la programación de una operación .....              | 34 |
| Figura 17: Pestaña "alturas" en la programación de una operación .....                | 35 |
| Figura 18: Pestaña "pasadas" en la programación de una operación.....                 | 35 |
| Figura 19: Pestaña "vinculación" en la programación de una operación .....            | 36 |
| Figura 20: Pestaña "mostrar" del módulo de simulación.....                            | 37 |
| Figura 21: Pestaña "Información" del módulo de simulación.....                        | 38 |
| Figura 22: Pestaña "estadísticas" del módulo de simulación.....                       | 38 |
| Figura 23: Video animación de las operaciones de mecanizado .....                     | 39 |
| Figura 24: Módulo de postprocesado.....   | 40 |
| Figura 25: Geometría 3D final del molde .....   | 42 |
| Figura 26: Ubicación de radios críticos .....   | 42 |
| Figura 27: Patrón para el grabado de símbolos .....                                   | 43 |
| Figura 28: Comparación de esfuerzos de mecanizado entre acero y aluminio<br>.....     | 44 |
| Figura 29: Pestaña "configuración" en la creación de una fase.....                    | 46 |
| Figura 30: Pestaña "materia" en la creación de una fase.....                          | 47 |
| Figura 31: Resultado final de la creación de la fase.....                             | 47 |
| Figura 32: Clasificación de materiales en el catálogo de ISCAR .....                  | 48 |
| Figura 33: Informe generado por la herramienta de Sandvik .....                       | 49 |
| Figura 34: Pestaña "general" al introducir una nueva herramienta.....                 | 50 |
| Figura 35: Pestaña "cortador" al introducir una nueva herramienta .....               | 50 |
| Figura 36: Pestaña "corte y caña" al introducir una nueva herramienta .....           | 51 |
| Figura 37: Pestaña "alcance y velocidad" al introducir una nueva herramienta<br>..... | 51 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 38: Página extraída del catálogo de ISCAR .....   | 52 |
| Figura 39: Guía de usuario de ISCAR para seleccionar los parámetros de corte .....   | 53 |
| Figura 40: Bocetos de apoyo.....   | 54 |
| Figura 41: Pestaña "herramienta" en la operación de planeado .....   | 56 |
| Figura 42: Pestaña "geometría" en la operación de fresado .....  | 56 |
| Figura 43: Pestaña "alturas" en la operación de planeado .....   | 57 |
| Figura 44: Pestaña "pasadas" de la operación de planeado.....  | 58 |
| Figura 45: Rutas para la operación de planeado .....   | 59 |
| Figura 46: Estado del tocho tras la operación de planeado .....  | 59 |
| Figura 47: Pestaña "herramienta" en la operación de taladrado.....   | 60 |
| Figura 48: Pestaña "geometría" en la operación de taladrado.....   | 61 |
| Figura 49: Pestaña "alturas" en la operación de taladrado .....  | 62 |
| Figura 50: Pestaña "pasadas" en la operación de taladrado .....  | 63 |
| Figura 51: Pestaña "vinculación" de la operación de taladrado.....   | 63 |
| Figura 52: Configuración del patrón de taladrado y rutas resultantes .....   | 64 |
| Figura 53: Estado del tocho tras la operación de taladrado.....  | 65 |
| Figura 54: Pestaña "herramienta" en la operación de desbaste pesado .....  | 66 |
| Figura 55: Pestaña "geometría" en la operación de desbaste pesado .....  | 66 |
| Figura 56: Pestaña "pasadas" en la operación de desbaste pesado.....   | 67 |
| Figura 57: Pestaña "vinculación" en la operación de desbaste pesado.....   | 68 |
| Figura 58: Geometrías para el desbaste pesado del resto del tocho .....  | 68 |
| Figura 59: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de desbaste pesado (solo se muestra sobre uno de los moldes)..... | 69 |
| Figura 60: Estado del tocho tras la operación de desbaste pesado.....  | 69 |
| Figura 61: Pestaña "pasadas" en la operación de desbaste ligero y detalle de acabado "en escalones" .....                        | 71 |
| Figura 62: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de desbaste ligero (solo se muestra sobre uno de los moldes)..... | 72 |
| Figura 63: Estado del tocho tras la operación de desbaste ligero .....   | 72 |
| Figura 64: Pestaña "herramienta" en la operación de acabado 4mm.....   | 73 |
| Figura 65: Pestaña "geometría" en la operación de acabado 4mm .....  | 74 |
| Figura 66: Pestaña "pasadas" en la operación de acabado 4mm .....  | 75 |
| Figura 67: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de acabado 4mm (solo se muestra sobre uno de los moldes) .....    | 75 |
| Figura 68: Estado del tocho tras la operación de acabado 4mm .....   | 76 |
| Figura 69: Pestaña "herramienta" en la operación de acabado 3mm.....   | 77 |
| Figura 70: Pestaña "geometría" en la operación de acabado 3mm .....  | 77 |
| Figura 71: Geometrías para el acabado 3mm en el resto del tocho .....  | 78 |
| Figura 72: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de acabado 3mm (solo se muestra sobre uno de los moldes) .....    | 79 |
| Figura 73: Estado del tocho tras la operación de acabado 3mm .....   | 79 |
| Figura 74: Boceto para la operación de grabado .....   | 80 |





|  |     |
|--|-----|
| Figura 75: Pestaña "herramienta" en la operación de grabado .....  | 81  |
| Figura 76: Pestaña "geometría" en la operación de grabado .....  | 81  |
| Figura 77: Pestaña "pasadas" en la operación de grabado.....   | 82  |
| Figura 78: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de grabado<br>(solo se muestra sobre uno de los moldes) ..... | 83  |
| Figura 79: Estado del tocho tras la operación de grabado.....  | 83  |
| Figura 80: Pestañas "información" y "estadísticas" del módulo de simulación<br>.....   | 84  |
| Figura 81: Comparación de piezas. Mecanizada vs referencia 3D.....   | 85  |
| Figura 82: Ventana del módulo de postprocesamiento .....   | 86  |
| Figura 83: Ejemplo del código CNC resultante .....   | 87  |
| Figura 84: Presupuesto final. Tabla resumen.....   | 90  |
| Figura 85: Portaherramientas de la fresa planeadora .....  | 97  |
| Figura 86: Plaquitas de la fresa planeadora .....  | 98  |
| Figura 87: Fresa plana de 20mm .....   | 99  |
| Figura 88: Fresa plana de 8mm.....   | 100 |
| Figura 89: Fresa de bola de 8mm.....   | 101 |
| Figura 90: Fresa de bola de 6mm.....   | 102 |
| Figura 91: Fresa de bola de 1mm.....   | 103 |



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. Introducción

El objetivo principal de este trabajo fin de grado será el mecanizado de un molde de aluminio, compuesto por dos mitades, para el moldeo por soplado de preformas mediante el uso del software propiedad de Autodesk, Inc. Inventor CAM.

Este estudio estará enfocado a la viabilidad industrial, de tal forma que se buscará la optimización del proceso desde la concepción de la geometría final, al tiempo de mecanizado, no olvidando la dedicación que suponga esta optimización en cuanto al tiempo que se deba dedicar a la creación de las estrategias de mecanizado.

Primeramente, se dará una visión general sobre que es la tecnología CAM, así como el estado de esta en la industria y su influencia actual en los procesos industriales. Asimismo, se comentarán las peculiaridades del proceso de moldeo por soplado de preformas, un método en auge actualmente debido a que, en determinadas circunstancias, ofrece unas ventajas notorias sobre otras alternativas.

También, se expondrá brevemente el entorno de Autodesk Inventor CAM, las opciones que ofrece y la interfaz de usuario de este programa, con miras a abarcar un proceso de mecanizado genérico.

Por último, siendo el bloque principal de este trabajo, se presentará de manera detallada y técnica el proceso de mecanizado de un molde de aluminio para moldeo de preformas por soplado, la selección de herramientas, las decisiones que se han ido tomando en el desarrollo del programa de mecanizado junto con sus consecuencias, y se presentará un presupuesto valorando todo el conjunto de operaciones involucradas hasta la obtención de la pieza final con las particularidades de hacerlo en Inventor CAM. Todo, desde la perspectiva comentada anteriormente.



## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es desarrollar una estrategia de mecanizado con fresadora de 3 ejes de un molde de aluminio para la generación de piezas por soplado de preformas, así como un presupuesto de taller del coste que de forma aproximada supondría su obtención, desde un prisma más bien académico.

Se ha seleccionado el software Inventor CAM para realizar este estudio puesto que es el programa que la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid utiliza en las asignaturas del área Ingeniería de los Procesos de Fabricación.

Adicionalmente, se tratarán temas periféricos al principal como son el proceso de moldeo para el que está concebido el molde o una explicación general del software utilizado.



## 2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo de fin de grado contará de 5 capítulos principales, además de la introducción al mismo, el presente planteamiento de la estructura que el texto seguirá, la bibliografía consultada y un anexo.

En el primer capítulo, se expondrá brevemente la evolución de la tecnología CAM desde su aparición y la importancia que ha adquirido hoy el apoyarse en softwares de este tipo para la industria.

En el segundo capítulo, se pondrá el foco en el procedimiento para el cuál el molde de estudio ha sido concebido; el moldeo por soplado de preformas.

En el tercero, se tratará de dar una introducción básica y una visión general del programa utilizado para el desarrollo de este trabajo, que, como se ha mencionado en varias ocasiones anteriormente, no será otro que Inventor CAM, de la compañía Autodesk, Inc.

En el cuarto, siendo este el grueso del trabajo, se llevará a cabo una explicación profunda de los diferentes pasos que se han ido siguiendo, desde que se recibe, como es este caso, el modelo 3D de la pieza a conseguir, pasando por la creación de una fase, la selección de herramientas y las estrategias de mecanizado oportunas, deteniéndonos, cuando sea necesario, a comentar algunos aspectos interesantes de las decisiones que se van tomando y las consecuencias que de ellas se deriven. Para finalizar este capítulo, se verificará el proceso, así como el resultado final, generando tanto el código CNC del programa como un presupuesto de los trabajos necesarios para materializarlo.

Por último, se expondrán unas conclusiones, tanto técnicas como personales, de todo lo que se haya ido relatando a lo largo del desarrollo del trabajo.

### 3. VISION GENERAL Y EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA CAM

Lo primero que debemos saber antes de continuar, es qué significan las siglas “CAM”. No es más que “Fabricación Asistida por Ordenador”, por sus siglas en inglés (Computer-Aided Manufacturing). Del mismo modo, otro concepto muy relacionado con este, y que tiene una importancia en la industria incluso mayor, es el “CAD”, que significa “Diseño Asistido por Ordenador”, también por sus siglas en inglés (Computer-Aided Design).

El CAD que constituye en nuestros días un paso previo casi insalvable para aplicar un software CAM a una pieza o componente.

En algunas publicaciones, generalmente de autores hispanoamericanos, se podría hacer referencia a estos conceptos como “DAC” (Diseño Asistido por Computadora) y “FAC” (Fabricación Asistida por Computadora).

Centrándonos en la tecnología CAM, y dando un repaso rápido a su evolución, podríamos hablar de 3 fases diferenciadas en su historia, hasta el momento:

- 1- Una primera etapa que recoge su nacimiento y desarrollo primitivo, en los años 50, muchos siglos después de otras tecnologías de fabricación y conformado de metales tan primitivas y antiguas como la fundición o la forja. Desde su aparición y las siguientes décadas, su desarrollo fue más lento y se fueron implementando los primeros prototipos en algunos ordenadores comerciales. El primer software del que se tiene constancia en el desarrollado por el Doctor Patrick Hanratty, nacido en 1931 en los Estados Unidos, llamado “Pronto”.
- 2- La etapa del crecimiento, que fue exponencial durante las últimas décadas del siglo XX, donde su uso se generalizó en las empresas industriales acelerando la automatización de procesos hasta entonces muy artesanales y lentos. De esta época de donde datan algunos de los softwares comerciales más conocidos como los de la estadounidense Autodesk, Inc. y la francesa Dassault Systèmes.
- 3- Finalmente, desde la entrada del siglo XXI hasta la época actual, donde su uso está ampliamente arraigado en sector manufacturero de la industria y que se ha visto potenciado por los avances en hardware y capacidad de computación de los ordenadores y máquinas. El conjunto CAD + CAM ha supuesto una verdadera revolución en la industria.



Una vez conocida la evolución temporal de esta tecnología desde su origen hasta nuestros días, centrémonos en las ventajas, y también en las desventajas, que aporta un programa CAM, un proceso de fabricación industrial.

Estas son:

### Ventajas:

- Mayor precisión. Los programas CAM (y CAD), son capaces de ajustar sus tolerancias a fracciones de milímetro, por lo que se garantiza la exactitud en las diferentes etapas del proceso, reduciendo los errores humanos. Esto redundará en una calidad mucho mayor en los productos finales.
- Influyen preventivamente en la etapa de diseño. Permiten ver dificultades simulando las operaciones antes de ejecutarlas físicamente, por lo tanto, reducen la necesidad de generar costosos prototipos con la detección de fallos e ineficiencias que se podrán corregir en el diseño original.
- Eficiencia en los tiempos de producción. Tanto en el diseño como en la fabricación, ya que estos softwares especializados ahorran mucho tiempo en tareas que antaño se hacían de forma manual, que costaban mucho tiempo y, además, eran propensas a errores, lo cual favorece a su vez la calidad.
- Flexibilidad y capacidad de personalización. Esto ofrece a los clientes de las empresas diseñadoras/fabricantes, ofrecer productos más atractivos a sus clientes mediante la personalización del aspecto final o la adaptación del diseño a una necesidad especial, lo que es una ventaja competitiva en un mercado que está muy parejo.
- Colaboración a distancia y optimización de espacios de almacenamiento. El uso de modelos informáticos permite ahorrar mucho espacio, ya que no se requiere el almacenaje ni de piezas ni de documentación en soporte físico. A su vez, estos archivos se pueden compartir de manera rápida y eficaz, permitiendo la colaboración entre empresas y departamentos e, incluso, el trabajo simultáneo desde equipos remotos.



### Desventajas:

- Gran inversión inicial. El software y hardware necesario para implementar un sistema CAM suele suponer un coste muy elevado, además, es casi obligatorio disponer de un programa CAD si el software CAM seleccionado no lo incorpora ya. Para empresas pequeñas, puede suponer un desembolso muy grande, pero, por lo general, a largo plazo suele compensar económicamente.
- Curva de aprendizaje. El dominio de las habilidades necesarias para manejar un programa CAM requiere tiempo y formación especializada, lo que repercute en la inversión inicial y una reducción de productividad durante la fase de adaptación.
- Riesgos de ciberseguridad. Derivados del almacenamiento online de información sensible, que siempre entraña riesgos.
- Dependencia de acceso a recursos. Principalmente el suministro eléctrico, la conexión a internet o a un ordenador con el software instalado.





## 4. PROCESO DE MOLDEO POR SOPLADO DE PREFORMAS

En este epígrafe se darán unas pinceladas, a modo de introducción, de los procesos más típicos de fabricación de piezas por moldeo.

Tras ello, se explicará en detalle el proceso de moldeo por soplado.

### 4.1. Procesos de moldeo más comunes

A continuación, como se comentaba anteriormente, se expondrán las técnicas de fabricación usuales que usan moldes, exceptuando la de soplado, que contará con un capítulo dedicado.

Los procedimientos más comunes con los que sigues, junto con una breve descripción y algún ejemplo representativo:

- Moldeo por inyección, uno de los más utilizados, donde un termoplástico, como el ABS, se inyecta a presión en las cavidades del molde. Se obtienen de esta manera los parachoques de vehículos o los carenados de las motocicletas.
- Termoconformado, que consiste en calentar una lámina de plástico y comprimirla entre las dos mitades del molde, que se cierran sobre ella, para que adopte su forma final. También se puede utilizar aplicando vacío para forzar a la lámina a pegarse a las paredes del molde. Se obtienen mediante este mecanismo piezas como embalajes o envases.
- Estampado, un proceso muy similar al anterior pero aplicado generalmente a metales. Se utilizan láminas o tochos metálicos calentados para aumentar su maleabilidad y un sistema capaz de ejercer suficiente fuerza, como una prensa hidráulica, para deformar el material, adoptando así la forma de las coquillas utilizadas. Por ejemplo, las láminas que conforman un intercambiador de placas.
- Fundición, seguramente el más antiguo de todos ellos. Su aplicación clásica es la de verter un metal fundido en el interior del molde para conseguir la forma final deseada o una preforma que se mecanizará posteriormente. Actualmente también se emplean siliconas y algunos plásticos según este procedimiento. Un ejemplo sería el cuerpo de una válvula o una tubería.

- Laminación de compuestos, quizá el más moderno en cuanto a materiales, aunque basado en los mismos principios. Unas láminas de materiales compuestos se colocan sobre el molde para que adopten su forma y, añadiendo resina, se forman piezas sólidas. Suelen emplearse con materiales técnicos como la fibra de carbono y de vidrio o el Kevlar, y se utilizan, entre otras aplicaciones, en piezas para competición.

Para completar este breve repaso del conformado por moldeo, se expondrán los tipos de molde y modelos más comunes en la industria. Una clasificación muy utilizada es la siguiente:

- Moldes permanentes: Son aquellos moldes que se pueden utilizar para el conformado de más de una pieza. Por lo general son de distintas aleaciones de acero. Se suelen utilizar para largas tiradas de producción, debido a que los costes de los útiles son altos. El coste unitario de las piezas, por el contrario, es bajo, y la calidad de acabados es muy buena, tanto en tolerancias dimensionales como en rugosidad superficial. Se utiliza generalmente con materiales con bajo punto de fusión, como por ejemplo plásticos o metales como el aluminio o el zinc.
- Moldes temporales: Hacen referencia a los moldes cuya vida útil se reduce a la fabricación de una única pieza. Lo más habitual son los moldes de arena o yeso, utilizados para piezas de tiradas menores o que no permiten un desmoldeo si se utilizasen moldes permanentes. La calidad es menor, por lo que para acabados mejores se debe dejar un sobrematerial que posteriormente se deberá mecanizar.

En cuanto a los modelos, puede hacerse una clasificación similar:

- Modelo permanente: El modelo es una réplica de la pieza final que se quiere obtener, aunque puede contener ciertas modificaciones, como recrecidos para mecanizados posteriores con el objetivo de conseguir una calidad mayor, o incluso huecos, para hacer insertos de materiales con propiedades diferentes a las del material base. Se utilizan, por ejemplo, para obtener las piezas de un molde de arena desechable.
- Modelo temporal: Son modelos que se destruyen en el proceso de conformado de la pieza o del molde, ya que suelen estar hechos de materiales que se funden o queman (con residuos mínimos) por calor, ya sea aplicado o del propio material fundido. Se crea en un material como cera una recreación de la pieza final, y sobre ella, se arma un molde. Bien calentando el molde o vertiendo directamente el metal fundido, el material del modelo deja su hueco al material de la pieza final. Un uso típico es en orfebrería, remontándose su aparición a los tiempos antiguos, usando materiales como cera de abeja o escayola.

## 4.2. Moldeo por soplado de preformas

Centraremos ahora nuestra atención en el proceso específico que se aplicará para la fabricación de piezas con el molde objeto de estudio, que es el moldeo por soplado de preformas. Como se ha comentado previamente en multitud de ocasiones, y como su propio nombre indica, este es un proceso de conformado de piezas por moldeo, pero que tiene unas características bastante únicas dentro de este conjunto de técnicas, principalmente en lo que atañe al tipo de piezas que se pueden conseguir siguiendo este método y a los requisitos de las preformas dedicadas a él.

Aportando un breve contexto histórico, es una técnica que vio sus inicios en la década de 1940 usando poliestireno (PS), y después polietileno de baja densidad (LDPE), que fue el usado en la primera aplicación industrial de gran volumen, botes de desodorante.

Vive su expansión industrial en los años 60, con la aparición de un mayor porfolio de materiales susceptibles de ser aplicados a este proceso, como el polietileno de alta densidad (HDPE), y el crecimiento de la disponibilidad comercial de maquinaria.

Hoy en día, la evolución de la técnica continúa, habiéndose conseguido ya el moldeo de piezas con geometría compleja, de varias capas e incluso de espesor de pared variable.

Se dará una descripción detallada de las diferentes partes que involucra esta tecnología, así como el desarrollo del proceso en sí.

### **Molde**

El molde debe ser de un material cuya temperatura de servicio máxima sea mayor que la requerida para que el material de la pieza deseada se deforme suficientemente para adaptarse a las geometrías del interior del molde. También es conveniente una buena conductividad térmica, mientras que la resistencia a tensiones y dureza superficial exigidas para este proceso no son muy demandantes.

Por ello, usualmente, el molde será metálico, aunque puede haber excepciones.

### **Preforma**

La preforma es, como de su nombre se puede deducir, el componente que se ha de obtener en un proceso previo al del soplado, por medio de alguna otra técnica.

Dependiendo del proceso de soplado específico que se utilice (existen 2, que se explicarán posteriormente) el material de partida para la etapa de soplado puede suponer una complejidad adicional nada despreciable, ya que puede suponer desde la obtención de un cilindro con una boquilla definida que permita el paso del aire comprimido, o simplemente una lámina de las proporciones adecuadas para el tamaño del molde. También reciben el nombre de precursor y, de forma más específica, parísón cuando se quiere hacer referencia a una preforma de tipo cilíndrico. En la Figura 1 se muestran ejemplos típicos de preformas.



*Figura 1: Preformas típicas para la fabricación de botellas de plástico*

Por otro lado, aunque la inmensa mayoría de piezas conformadas según esta técnica son de algún tipo de plástico, también se puede aplicar a objetos de vidrio, con las adaptaciones necesarias durante el procedimiento.

### Proceso

Como se comentaba, existen dos variantes principales del proceso de soplado.

Son el proceso de extrusión-soplado y el proceso de inyección-soplado, donde el primero supone el 75% de la producción y el otro el 25% restante.

- **Extrusión-soplado:** En este proceso se realiza en una sola etapa, donde una máquina funde los gránulos del material base y los empuja a través de una matriz, extruyéndolos, con la forma adecuada para el producto final. En el caso de botellas, un caso muy habitual, esta forma suele ser un cilindro.

El material fundido recién extruido, entra en el molde de soplado, donde se sella en su extremo inferior y se cierra el molde. A continuación, se corta por su parte superior y entra otro cabezal que inyecta aire comprimido en el interior de plástico, forzando a este a adaptarse a la forma de las paredes del molde.

El molde, previamente enfriado, cristaliza el plástico, haciendo que adopte de forma permanente la forma de la pieza final.

Este método es el más rápido de todos y el más barato en cuanto a inversión inicial, pero solo es adecuado cuando las exigencias de control de espesor no son muy altas y no se buscan espesores variables. Por otro lado, se producen recortes de material, por lo que el aprovechamiento de la materia prima es inferior al 100%.

En la Figura 2, se puede ver un esquema paso a paso de esta técnica.

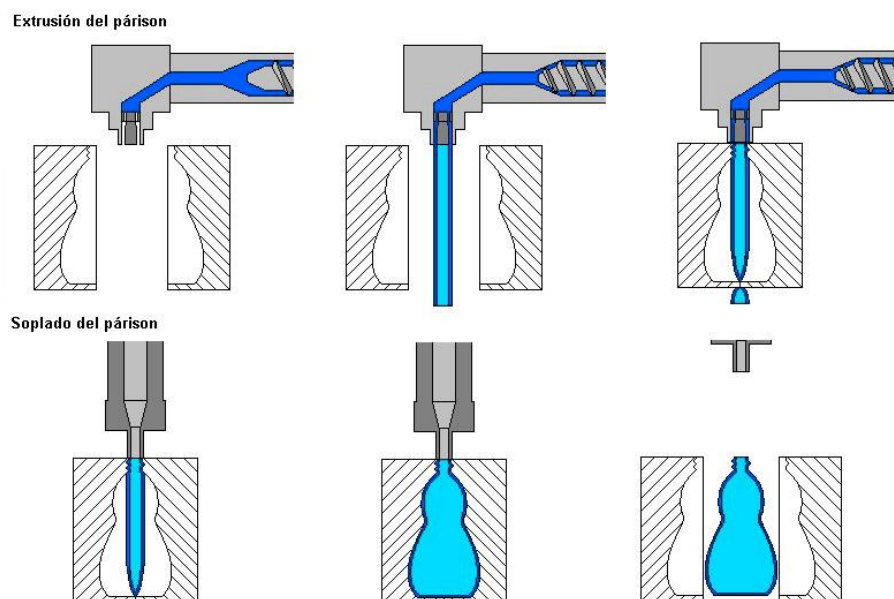


Figura 2: Proceso de extrusión-soplado paso a paso

- **Inyección-soplado:** Este proceso se caracteriza por que la preforma admite mucha más complejidad para buscar propiedades más avanzadas tanto a nivel físico como químico en la pieza final. En este método, tiene lugar dos etapas bien diferenciadas.

La primera es la creación de la preforma, que se obtiene inyectando el plástico fundido en un molde, que será el que le dé la forma al precursor. En este punto existe la posibilidad o bien de enfriar la preforma y almacenarla para su posterior etapa de soplado o extraer la preforma de la estación de soplado aún fundida e introducirla en el molde de soplado para seguir el mismo proceso de inyección de aire comprimido que en el método anterior.

Esta técnica es más adecuada cuando se buscan espesores de pared y pesos del producto final muy acotados, así como un acabado superficial mejor. A destacar, que el acabado del cuello es especialmente bueno, haciendo las piezas obtenidas de esta manera más indicadas para el uso por parte de niños. También se debe mencionar que de este modo no se producen recortes, por lo que es un método más eficiente desde el punto de vista de aprovechamiento de los recursos, lo que se acompaña con que admite una gama de plásticos más amplia que el proceso de extrusión soplado.

Por el contrario, tiene la limitación de que no es apto para la producción de botellas con asas ni está indicado para envases con un volumen final superior al medio litro.

En la Figura 3, se puede ver un esquema paso a paso de esta técnica.

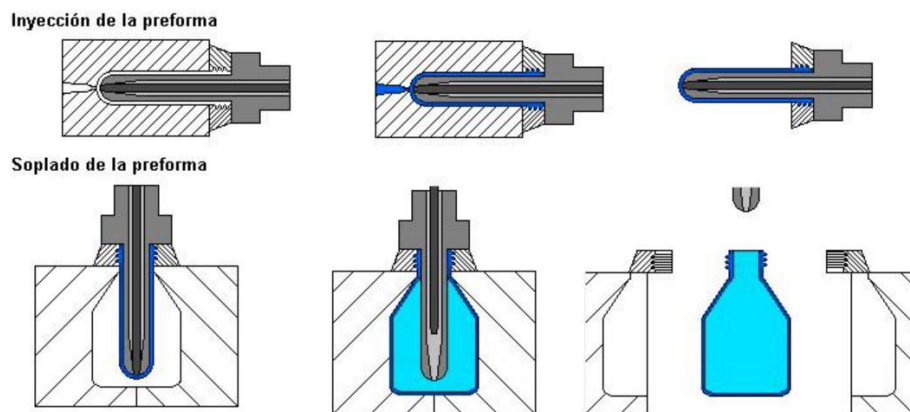


Figura 3: Proceso de inyección-soplado paso a paso

Una variación de gran importancia en la industria del proceso de inyección-soplado es el denominado tensión-soplado o estirado-soplado, según la bibliografía consultada.

Su uso, aunque muy específico, goza de gran importancia debido a su aplicación, que es la generación de botellas para bebidas carbonatadas. Este tipo de botellas debe ser impermeable al CO<sub>2</sub> y soportar las presiones que en su interior se puede generar, de hasta 5 bares.

Además, permite obtener el mayor valor de transparencia de la botella de entre todos los procesos de soplado, algo muy valorado por el consumidor y, por tanto, por la industria.

La peculiaridad de este método es que, tras la generación de la preforma (generalmente por inyección), esta se temple para evitar la cristalización del material. En este punto se puede optar por almacenar la preforma o llevarla a la siguiente estación del proceso, donde se recalienta hasta una temperatura ligeramente superior a la de transición vítrea y, posteriormente se introduce en el molde de soplado.

En el proceso final, el material se tensiona al mismo tiempo axial y radialmente, lo que se lleva a cabo soplando el aire comprimido mientras que una barra central entra dentro de la pieza y la estira hacia el fondo del molde. En la Figura 4 puede verse esquematizado este proceso.

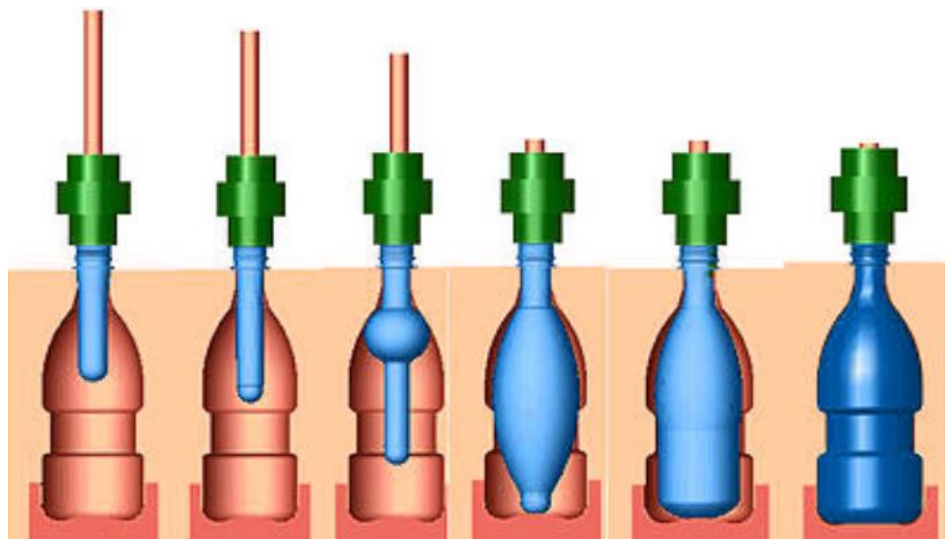


Figura 4: Proceso de tensión-soplado

Aplicar esta tensión a la temperatura correcta permite que se formen en el material pequeñas láminas cristalinas, lo que significa que la tenacidad y resistencia del material de la pieza final es mucho mayor, además de obtener las propiedades de barrera necesarias para asegurar la estanqueidad a gases como el CO<sub>2</sub>. Por otra parte, para obtener las mismas propiedades mecánicas que con otros procesos, el de tensión-soplado permite ahorrar entre el 10% de material y hasta el 30% cuando el volumen final supera el litro.



Por supuesto, este proceso es el más caro de todos en cuanto a la inversión inicial y a al procedimiento productivo de las piezas, pero las características finales que se consiguen no pueden ser igualadas por ningún otro.

Para finalizar este apartado, comentaremos que las presiones de inyección de aire en los moldes para el PET, (Polietileno Tereftalato), el material más utilizado en operaciones de soplado para botellas, suele realizarse alrededor de los 28 bar, pero es posible encontrar en la industria procesos que se realizan entre los 18 y los 40 bar, dependiendo de la geometría, espesores de la preforma y material utilizado.

Sin embargo, para el caso concreto de preformas de vidrio, las presiones son mayores, debido a que la viscosidad es mucho más alta, al igual que los espesores con los que se trabaja.





## 5. ENTORNO DE AUTODESK INVENTOR CAM

En este epígrafe se dará una visión muy aséptica del entorno del software utilizado para el desarrollo de este trabajo fin de grado, Inventor CAM, orientada al fresado de piezas.

Comenzaremos con una pequeña introducción: Autodesk Inc, la desarrolladora y dueña del programa, es una compañía estadounidense, en concreto californiana, nacida en 1982 dedicada al desarrollo de software para diseño en 2D y 3D para diferentes sectores de la industria, como el manufacturero o la construcción e infraestructuras, entre otros. Junto al entorno Inventor, como sus creaciones más conocidas, podemos citar Autodesk y Revit, ambos softwares utilizados por la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid en sus programas de estudio.

En cuanto a Inventor CAM, es una funcionalidad dentro del paquete de Inventor, que incluye también funciones de CAD 3D, optimización de tolerancias, procesos productivos y otras muchas herramientas útiles para un proceso industrial completo. En lo que este trabajo atañe, es importante destacar la integración en un mismo entorno de funcionalidades tan relacionadas como son el CAD y el CAM, lo que permite reducir el tiempo empleado en el proceso, reducir la inversión inicial, evitar tener que importar modelos entre programas mediante formatos universales para no sufrir problemas de compatibilidad, lo que puede derivar en la pérdida de información.

Las opciones de mecanizado que ofrece el programa abarcan todos los procesos mayoritarios de la industria, como son:

- Taladrado
- Fresado en 2.5 ejes
- Fresado en 3 ejes
- Fresado en 5 ejes simultáneos y en 3+2 ejes
- Torneado
- Corte bidimensional por chorro de agua, corte laser y por plasma

## 5.1. Interfaz de usuario

Describiremos, en un primer lugar, el entorno gráfico de Inventor indicando donde se encuentran y como acceder a las funciones principales y más habitualmente utilizadas, como abrir un archivo, importar modelos 3D, etc.

Al abrir la aplicación, la pantalla que aparece es la que se muestra en la Figura 5, donde podemos observar varias secciones con las que interactuar. En la parte izquierda de la ventana aparece en primer lugar un desplegable donde por defecto está seleccionada la versión “default”, que hace referencia a que se creará/abrirá un proyecto de diseño mecánico. La única alternativa disponible es la del entorno para un proyecto eléctrico.

Debajo encontramos las opciones para crear un nuevo proyecto o abrir uno ya existente. Inventor permite abrir archivos .STP, por lo que podremos importar modelos 3D generado con otros softwares CAD, si fuese el caso. La sección principal, que ocupa la mayor parte de la pantalla, viene titulada como “recientes”, y nos muestra los archivos que más recientemente se han abierto con el software.

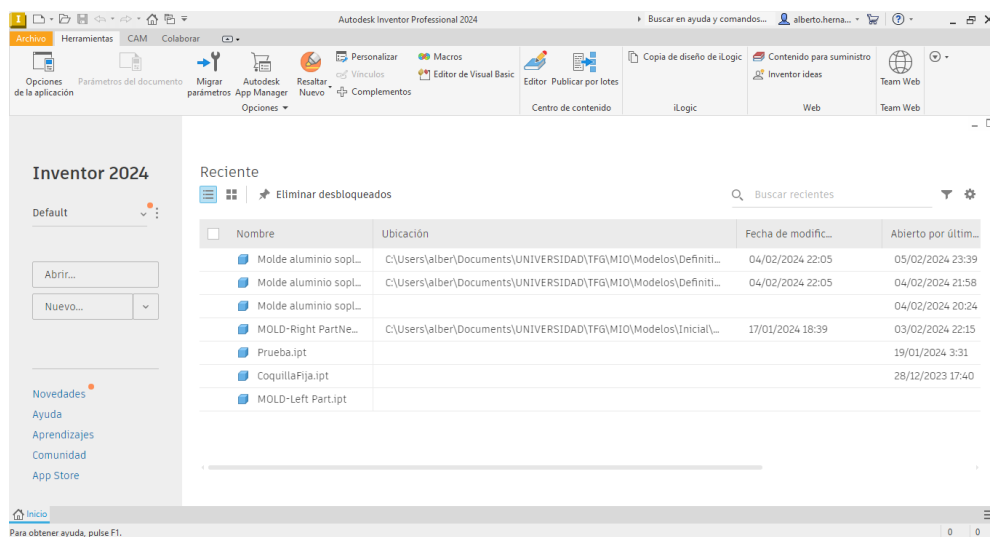


Figura 5: Pantalla de inicio de Inventor

En la parte superior, tenemos un sistema de ventanas, donde podemos encontrar, como se muestra en detalle en la Figura 6, las siguientes opciones:

- **Herramientas:** Es en esta pestaña donde se nos ofrecen los botones para acceder a las distintas configuraciones del software.

- **CAM:** En esta pestaña vuelven a aparecer las opciones de crear un nuevo proyecto o abrir uno nuevo, las configuraciones específicas de esta área de trabajo y también el acceso a la biblioteca de herramientas, por si quisiésemos modificarla fuera de algún proyecto específico.
- **Colaborar:** Aquí se encuentran las funcionalidades para trabajar colaborativamente con otros usuarios de la aplicación, ya sea gestionando los modelos compartidos o el intercambio de información.



Figura 6: Detalle de la parte superior de la pantalla de inicio.

Además, aparece en multitud de sitios botones que nos conducen a la guía de ayuda de Inventor e incluso a videotutoriales para aprender a movernos y usar el programa.

A continuación, explicaremos muy brevemente las opciones de las pestañas “Modelo 3D” y “Boceto”, además de la de “CAM”, ya que se corresponden con las que componen el módulo que categorizaríamos como CAD. Estas opciones, la de CAM, y muchas otras, solo aparecen cuando se abre o crea un proyecto.

La pestaña “Modelo 3D”, mostrada en la Figura 7, contiene las operaciones que se pueden aplicar sobre geometría 3D ya existente o sobre la geometría 2D generada a partir de un boceto. La opción para iniciar un nuevo boceto 2D se encuentra a la izquierda del todo dentro de la cinta de operaciones de esta ventana.



Figura 7: Pestaña “Modelo 3D”

Como se puede observar no solo se ofrecen operaciones que modifican la geometría de la pieza o crean estructuras de soporte como planos o puntos, si no que se disponen de opciones de simulación frente a tensiones aplicadas en la pieza o convertir la geometría a desarrollo de chapa plana, muy útil cuando se trabaja con perfiles a partir de chapa plegada y cortada por láser, muy utilizados, por ejemplo, en la fabricación de toda clase de equipos y máquinas.

La pestaña “Boceto”, ilustrada en la Figura 8 contiene también la opción de iniciar un nuevo boceto 2D, pero recoge todas las operaciones que aplican a esa fase del diseño.

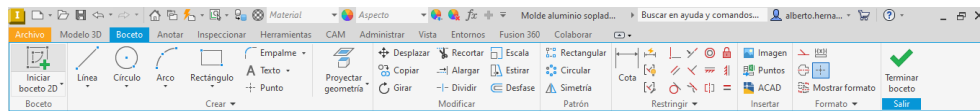


Figura 8: Pestaña "Boceto"

Es interesante destacar que desde aquí se pueden integrar en Inventor archivos creado en AutoCAD, una herramienta que muchas empresas utilizan, lo que tiene ventajas a la hora de implementar este software para funciones CAD 3D y CAM, en comparación con otros que existen en el mercado.

En la pestaña “CAM”, encontramos toda la librería de operaciones disponibles para mecanizar, organizadas por tipología de máquina o centro de mecanizado con el que trabajar, así como el acceso a la biblioteca de herramientas y las configuraciones previas al inicio de la selección de las estrategias de mecanizado. Se puede ver en la Figura 9.

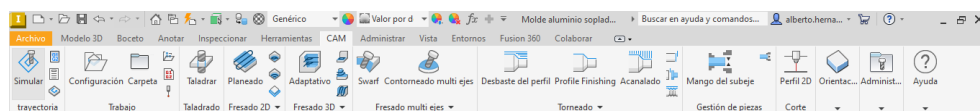


Figura 9: Pestaña "CAM"

Para finalizar, tal y como se muestra en la Figura 10, tenemos siempre visible (una vez hayamos creado o abierto un proyecto) una ventana donde se nos ofrecen dos pestañas llamadas “Modelo” y “CAM”, respectivamente.

Cada una de ellas contiene un árbol correspondiente al conjunto de operaciones que hayamos aplicado con respecto a la tipología a la que hacen referencia.

La pestaña “modelo” se activa siempre por defecto, ya que el punto de partida de este software es siempre algún tipo de geometría, ya sea 2D o 3D, mientras que la pestaña CAM solo aparecerá cuando, dentro de la pestaña CAM de la cinta de opciones principal, creamos una nueva fase desde el botón “Configuración”, dentro del menú trabajo.

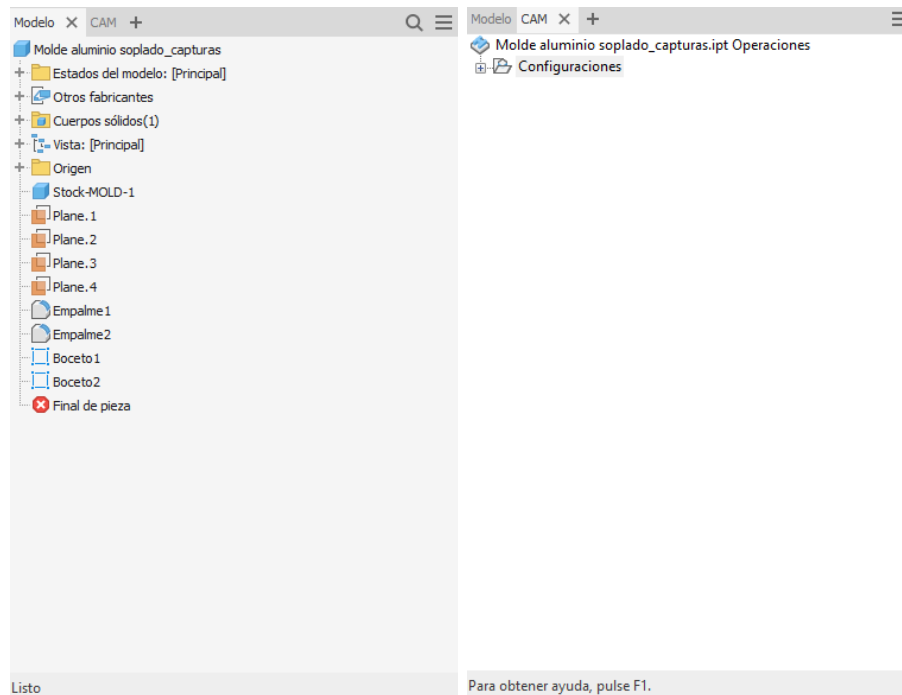


Figura 10: Árboles de operaciones CAD y CAM

## 5.2. Procedimiento genérico de mecanizado

Pasaremos ahora a exponer, de forma universal, los pasos principales y como se debería proceder para poder generar un programa de mecanizado genérico.

Todos los accesos, botones y menús que aquí se mencionen, estarán ubicados dentro de la pestaña “CAM”.

### 5.2.1. Creación de una fase

Este es el primer paso que se ha de dar cuando queremos desarrollar un programa funcional de mecanizado. Es primordial debido a que en este punto se determinarán cosas tan importantes como el tipo de mecanizado que se va a realizar: fresado, torneado, corte... También definiremos la máquina a utilizar, el tocho de partida, con sus dimensiones, material y método de agarre y el sistema de coordenadas de trabajo.

Se ha de tener en cuenta que, si cambiamos cualquiera de los parámetros anteriores, como, por ejemplo, si pasamos a usar un sistema de sujeción de la pieza diferente, lo correcto sería crear una nueva fase.

Para iniciar la creación de la fase, haremos clic sobre el botón llamado “configuración”, dentro del área “trabajo”. Aparecerá un cuadro de diálogo a la izquierda de la pantalla como el mostrado a continuación en la Figura 11.

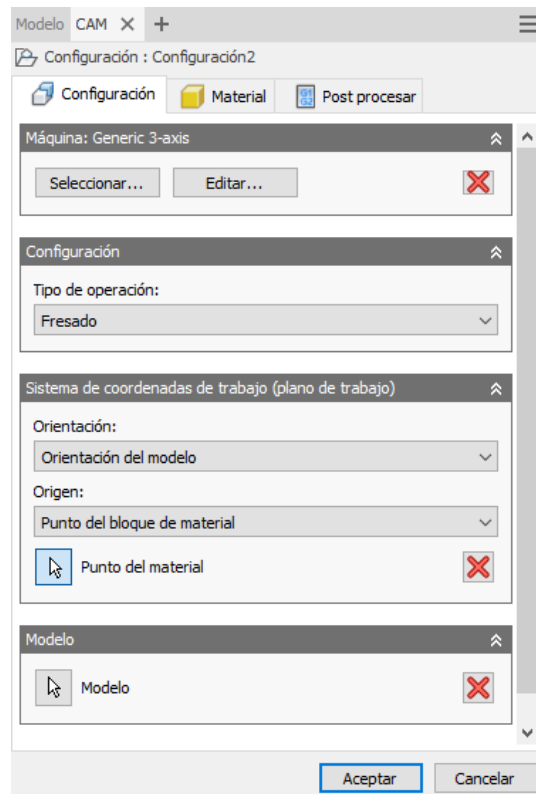


Figura 11: Nueva configuración CAM

Dentro de este cuadro de diálogo tenemos tres subpestañas disponibles:

- Configuración: Aquí es donde seleccionaremos la máquina a utilizar, el tipo de mecanizado, sistema de coordenadas, geometría final de la pieza tras el mecanizado y el aparataje de sujeción.
- Material: Área que nos permite definir el tocho de partida, en cuanto a material y dimensiones iniciales.
- Postprocesar: Permite nombrar el programa CNC resultante, añadir comentarios y definir el plano de trabajo. Esta opción es opcional en este punto.

## 5.2.2. Biblioteca de herramientas

Una forma de trabajar muy recomendable es generar una biblioteca de herramientas personalizada para el trabajo que se va a realizar. Ello permite tener todas las herramientas que se quieran utilizar agrupadas, ordenadas y accesibles en un solo lugar.

Para crear una biblioteca nueva, deberemos acceder al menú de la biblioteca de herramientas de Inventor, lo que hace a través del icono principal del área “administrar”.

Una vez dentro, nos encontraremos con el menú que se muestra en la Figura 12.

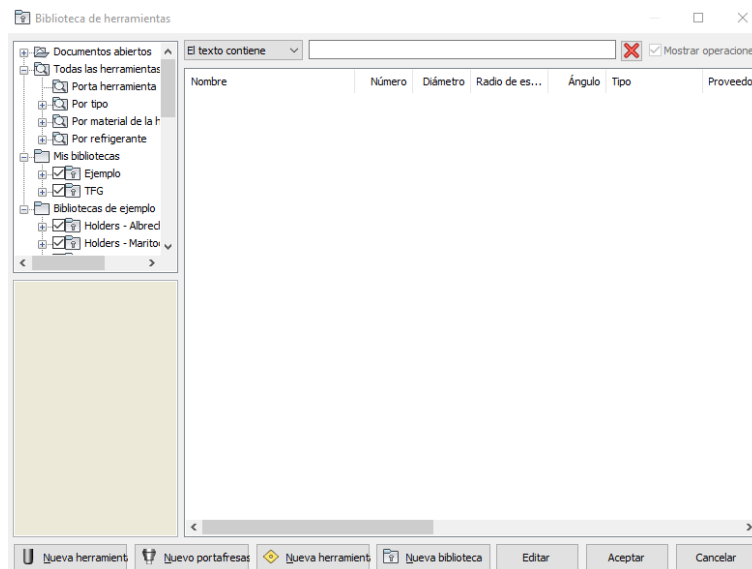


Figura 12: Creación de una biblioteca de herramientas

En el apartado izquierdo, tenemos un árbol con 4 ramas principales, que hacen referencia a los documentos abiertos en la sesión actual, todas las herramientas guardadas en el programa, las bibliotecas personalizadas del usuario y las bibliotecas de ejemplo que Inventor CAM posee por defecto. Será teniendo seleccionada la rama “Mis bibliotecas” cuando debamos presionar el botón de la barra inferior que ejecuta la creación de una nueva biblioteca.

Tras darle el nombre apropiado, si seleccionamos la biblioteca recién creada, se nos habilitará en la parte inferior el botón de crear una nueva herramienta, mediante el cual podremos introducir y guardar, con un nombre personalizado si lo deseamos, los parámetros de la herramienta seleccionada.

En la Figura 13, se muestra el cuadro de diálogo donde introducir todos estos parámetros. No entraremos en detalle a explicar el procedimiento, ya que en el capítulo 6.2 se puede consultar un ejemplo práctico.

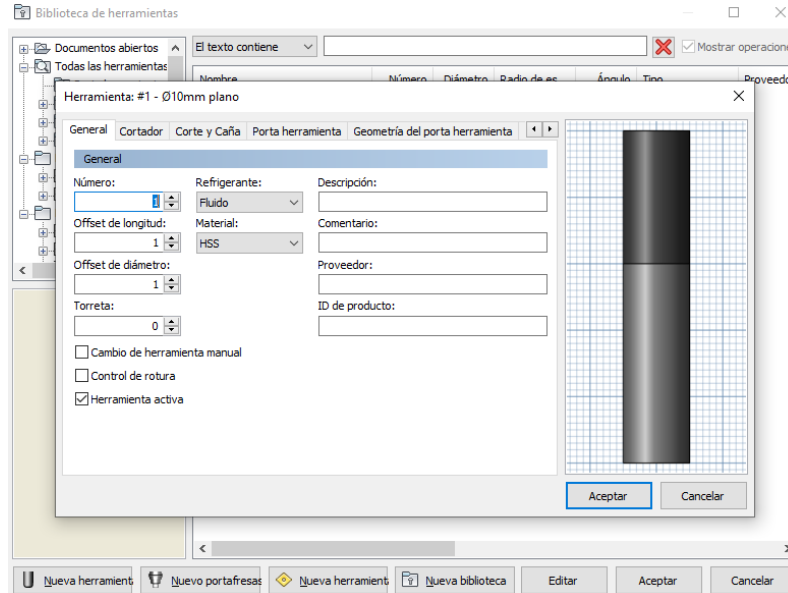


Figura 13: Introducción de una nueva herramienta

Una vez guardadas todas las herramientas que creamos necesarias, tendremos en nuestra biblioteca personalizada un listado de ellas, tal y como se muestra a continuación (Figura 14), y desde donde podremos modificarlas, añadir alguna adicional y e incluso eliminarlas.

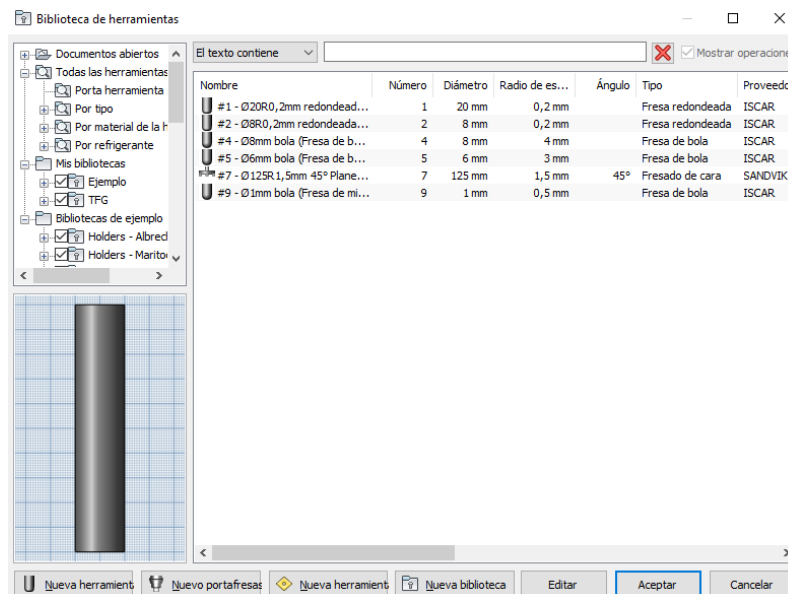


Figura 14: Biblioteca de herramienta completa



### 5.2.3. Programación de las operaciones de mecanizado

Una vez teneos correctamente configurada la fase y las herramientas que vamos a utilizar, podemos proceder a la programación de las estrategias de mecanizado que creamos más conveniente realizar sobre el tocho de partida para obtener la geometría final del molde.

Para ello, Inventor pone a nuestra disposición, como ya se ha comentado, operaciones de varios tipos, como son taladrado, torneado, fresado en varios ejes y corte, tal y como se enseñó en la Figura 9.

Para mostrar de forma genérica las opciones dentro de una operación de fresado, se tomará como ejemplo una cajera 3D. Las parametrizaciones disponibles cambiarán en función la operación de mecanizado que se escoja, pero siempre aparecerán organizadas en las mismas 5 pestañas siguientes:

- Herramienta: En este menú, seleccionaremos la herramienta. Al hacerlo, automáticamente se importarán los parámetros de corte que hayamos introducido en su creación, pero serán editables en este punto, ya que las herramientas ofrecen un abanico en las condiciones de funcionamiento y pueden ser óptima unas u otras en función de la operación a realizar; un desbaste, un acabado, etc. Puede verse la apariencia de este menú en la Figura 15.

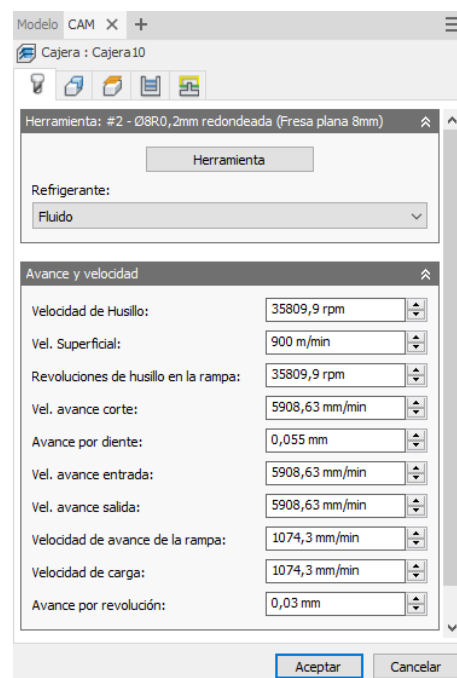


Figura 15: Pestaña "herramienta" en la programación de una operación

- Geometría: Será dentro de este menú donde indiquemos al programa sobre qué área de trabajo (perpendicular al eje Z) tiene que calcular las trayectorias. Tenemos también la opción de cambiar la referencia de ejes para esta operación concreta. Se muestra lo expuesto en la Figura 16.

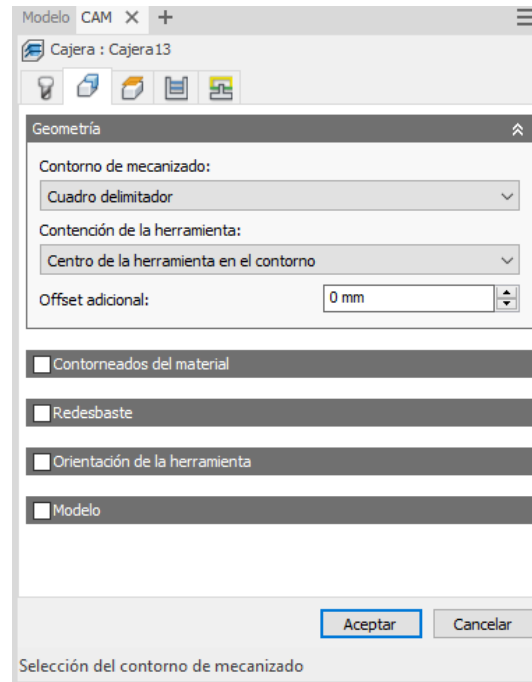


Figura 16: Pestaña "geometría" en la programación de una operación

- Alturas: Dentro de esta pestaña, vincularemos los diferentes planos de movimiento de la herramienta a unas alturas que podamos referenciar al modelo 3D. Ver Figura 17.

En concreto, las alturas principales que debemos definir son:

- Altura de seguridad, que indica la altura a la que la herramienta se desplaza en su camino hacia en principio de la ruta de corte.
- Altura de retracción, que hace referencia a la altura a la que se desplaza la herramienta para recolocarse entre una pasada de corte y la siguiente.
- Altura del avance, que es a la que la herramienta se desplaza para cambiar a la velocidad de avance antes de penetrar en el material.
- Altura superior, que es la primera altura donde existe material a mecanizar.
- Altura inferior, que debe indicar al menos la profundidad máxima del mecanizado del área seleccionada.

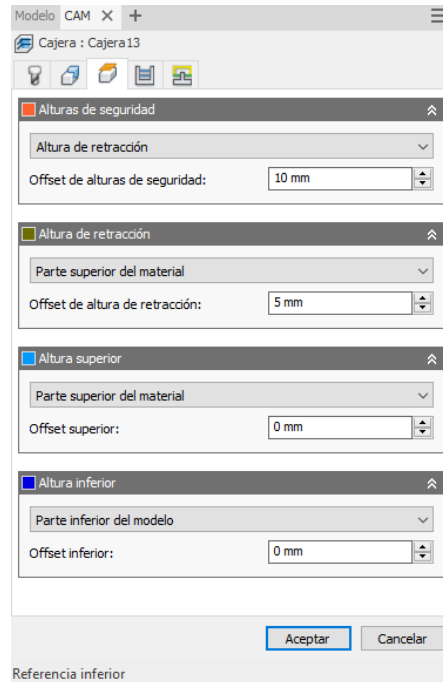


Figura 17: Pestaña "alturas" en la programación de una operación

- Pasadas: En esta pestaña se configuran los parámetros de la operación de mecanizado que tienen que ver con la manera en la que se van a realizar los cortes de material, como por ejemplo si se quiere dejar un sobrematerial o activar una pasada final de acabado con la misma herramienta, etc. Se ilustra en la Figura 18.

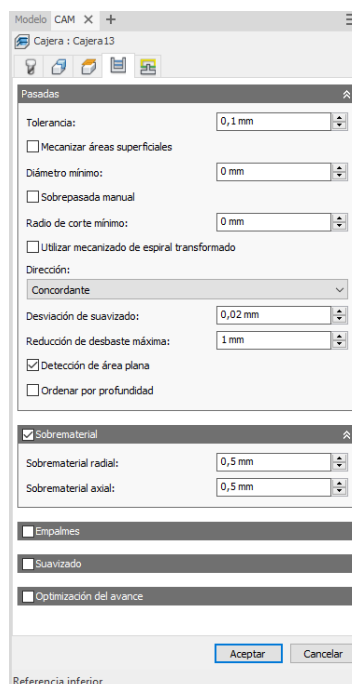


Figura 18: Pestaña "pasadas" en la programación de una operación

- Vinculación: En este último menú, encontramos, tal y como se puede apreciar en la Figura 19, las opciones relacionadas con los movimientos de la herramienta entre dos fases de corte, como por ejemplo la forma de las entradas y salidas del material, velocidades, tipos de rampas con parametrizaciones geométricas varias, etc.

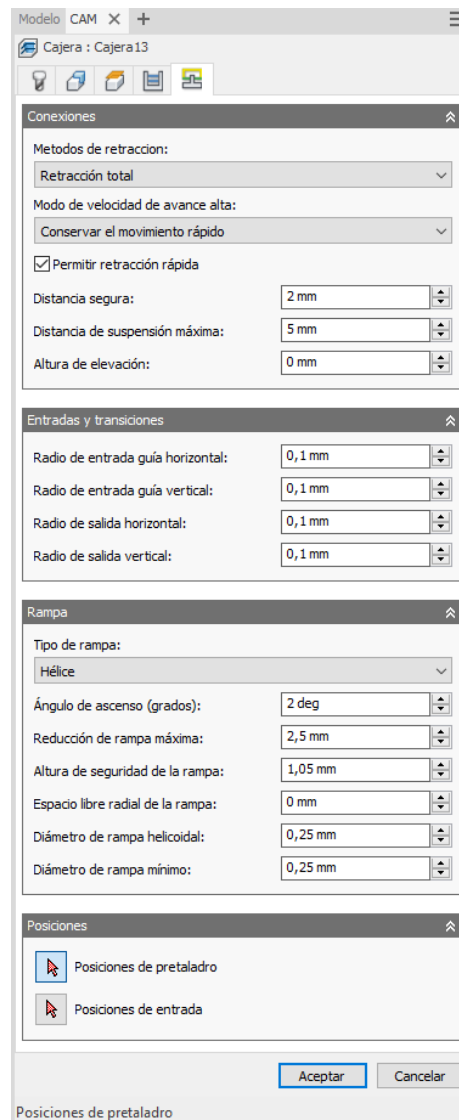


Figura 19: Pestaña "vinculación" en la programación de una operación

#### 5.2.4. Verificación y postprocesado

Ambos pasos se realizarán una vez se haya definido completamente la operación de mecanizado seleccionada y el software haya realizado los cálculos necesarios para su consecución.

## Verificación

La verificación del resultado se hará principalmente analizando la información, tanto gráfica como numérica, que nos ofrece la opción de “Simular” de Inventor. Esta se encuentra, en el área “trayectoria” de pestaña principal “CAM” del programa, y simulará el mecanizado de aquellas operaciones que tengamos seleccionadas en el árbol de operaciones, desde una concreta a la fase (llamada Configuración por defecto) completa, por lo que puede ser muy útil se es capaz de analizar correctamente lo que muestra.

Si pulsamos sobre el botón simular, aparecerán 3 pestañas:

La primera, denominada “mostrar” nos ofrece distintas opciones para mostrar u ocultar en pantalla distintos elementos de la simulación y es donde se encuentra la casilla para indicar que se detenga la simulación en caso de colisión, una característica muy útil. Figura 20.

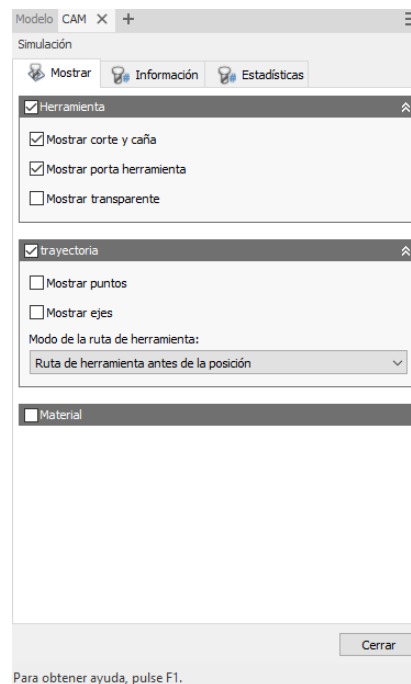


Figura 20: Pestaña "mostrar" del módulo de simulación

Además, en el apartado material podemos indicar que la simulación se detenga al encontrar una colisión y colorear las distintas operaciones de mecanizado en función de varios criterios, algo muy útil para interpretar de forma sencilla la información gráfica mostrada.

La segunda, llamada “Información”, nos ofrece la posición coordinada de la herramienta en todo momento, datos de la operación y de la máquina y, como parte más interesante, el área “verificación”, donde podemos consultar el número de colisiones detectadas, el volumen inicial de la pieza y final tras la operación y la distancia entre el material real restante y la geometría del moldeo 3D introducido en el punto sobre el que situemos el cursor. Figura 21.

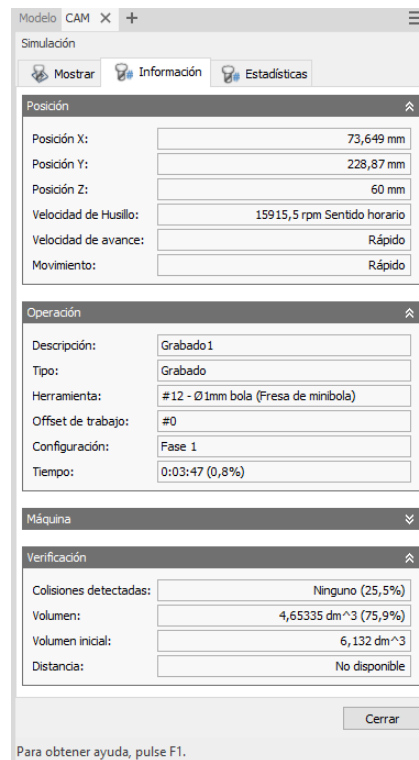


Figura 21: Pestaña "Información" del módulo de simulación

La última pestaña es “Estadísticas”, y en ella podremos consultar el tiempo de mecanizado de la operación o de la fase, en función de que hayamos querido simular, número de operaciones y cambios de herramientas si procede, y la distancia de mecanizado. Figura 22.

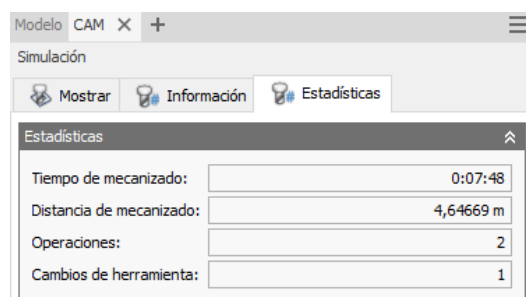


Figura 22: Pestaña "estadísticas" del módulo de simulación

Por último, el software ofrece ver en una animación de video el proceso de mecanizado. Los botones de la parte inferior de la ventana central, mostrados en la Figura 23, permiten controlar la velocidad de simulación, pausarla y reanudarla o enviarla al inicio de la operación siguiente o de la anterior.

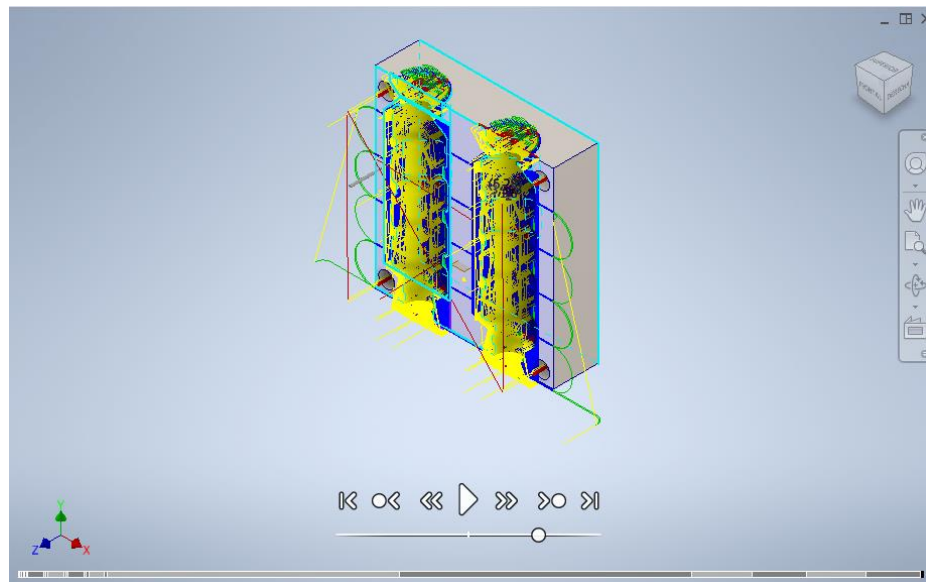


Figura 23: Video animación de las operaciones de mecanizado

Podemos navegar también de un punto a otro de la simulación directamente en la barra de tiempo de la parte inferior, donde además se nos indica con distintos colores cada una de las operaciones que hayamos hecho formar parte de la simulación y, con barras rojas, todas las colisiones detectadas

### Postprocesado

El paso final de un programa de mecanizado que esté orientado a la producción de la pieza, es obtener el código CNC de control de la máquina.

Para ello, también en el panel “trayectoria” donde encontrábamos la función de simular, tenemos el comando “postprocesar”, que abre una ventana de diálogo como la mostrada en la Figura 24.

Esta función de Inventor permite seleccionar entre una gran cantidad de fabricantes y versiones, el postprocesador que se quiera utilizar para generar el código que la máquina de control numérico necesita para poder reproducir las trayectorias generadas, por ello, esta selección se hará basada en la máquina real que mecanice la pieza.

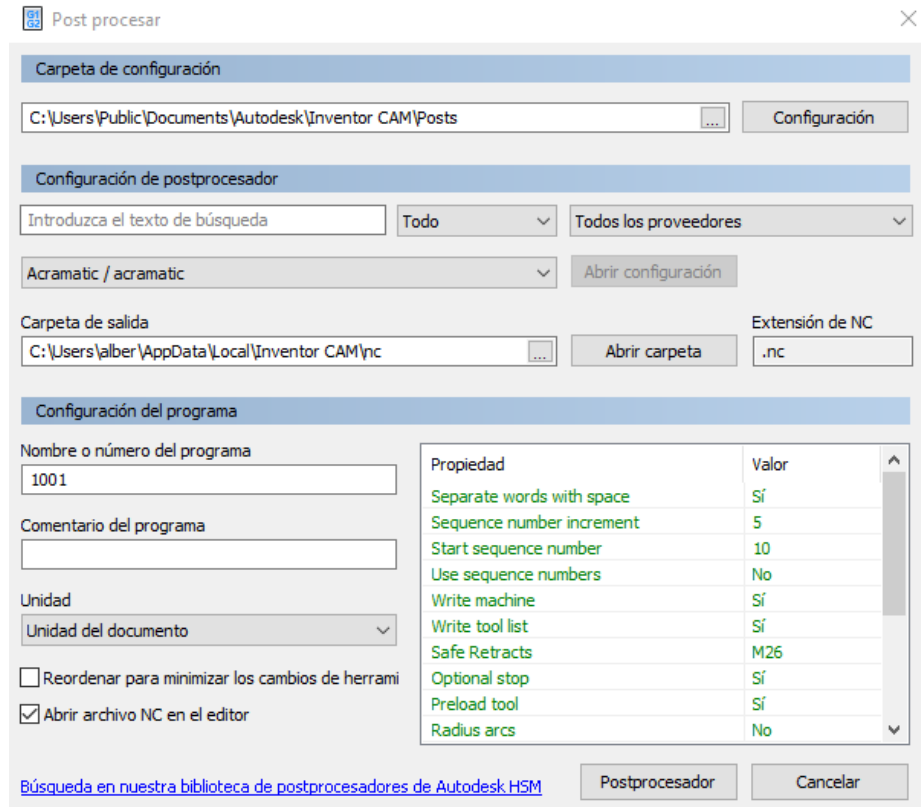


Figura 24: Módulo de postprocesado

Además, este cuadro nos permite elegir la carpeta de salida del archivo, el nombre o número del programa, así como algún comentario adicional. El botón “publicar” es el que, en este caso, lanza el proceso de creación del programa CNC.



## 6. MECANIZADO DE UN MOLDE DE ALUMINIO PARA CONFORMADO DE BOTELLAS POR SOPLADO DE PREFORMAS

Habiendo realizado un recorrido completo por el entorno de Inventor CAM, así como por todos los pasos que se han de seguir para realizar un mecanizado de principio a fin, en este epígrafe mostraremos el proceso aplicado a una pieza muy similar a las que realmente podríamos encontrar en la industria, profundizando cuando sea necesario para ofrecer una visión más completa de lo que pueden aportar algunas de las distintas opciones que el software pone a nuestra disposición

### 6.1. Molde

En este primer capítulo trataremos todo lo que tiene que ver con el molde que se quiere obtener, desde las peculiaridades geométricas que es importante detectar antes de comenzar, hasta analizar la aplicación para poder seleccionar el material óptimo.

El molde completo constará de dos mitades simétricas, por ello, solo se va a analizar y mostrar en las subsiguientes figuras una de ellas, por claridad y comodidad, refiriendo los datos de tiempos de mecanizado a una sola mitad del molde.

#### 6.1.1. Descripción de la geometría final objetivo

Como se puede apreciar en la Figura 25, este molde permitirá el conformado de dos piezas simultáneamente, pero, al ser iguales, será suficiente con analizar una de las oquedades principales para poder seleccionar las herramientas adecuadas y los procesos de mecanizado adecuados.

Los agujeros cilíndricos de las esquinas son los que permiten que ambas mitades del molde se acoplen de forma precisa, sin holguras, para que las piezas generadas no presenten marcas superficiales donde se produce el contacto entre las mencionadas mitades. Por ello, su tolerancia dimensional y acabado deben ser de calidad.

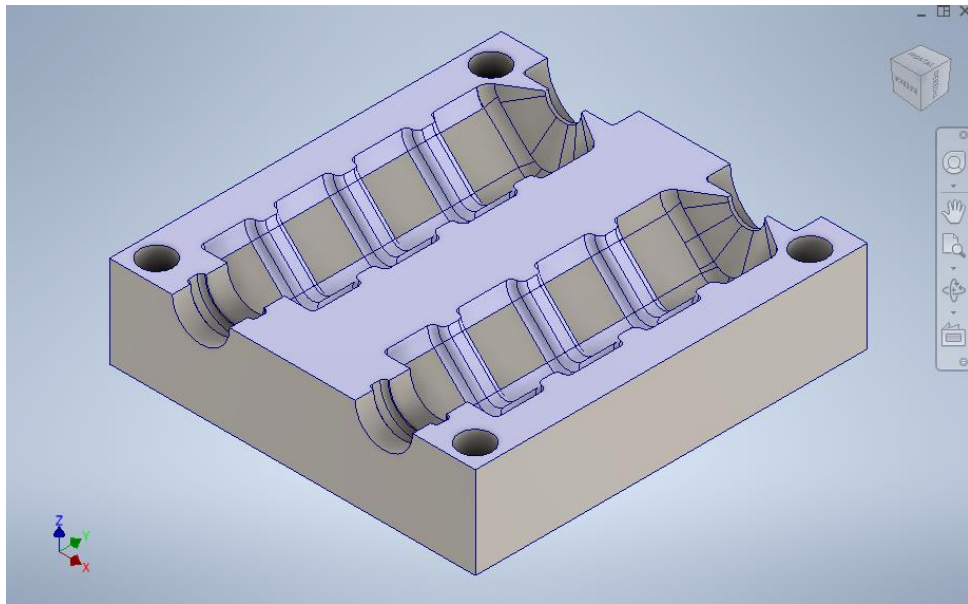


Figura 25: Geometría 3D final del molde

También tenemos que prestar atención a la profundidad de estos, ya que necesitaremos una herramienta suficientemente larga como para poder llegar al fondo sin que se produzcan colisiones.

En cuanto al hueco central, perteneciente al cuerpo de la botella, podemos apreciar que el radio mínimo de la geometría es 4mm.

Por otro lado, en los huecos auxiliares, encontramos en ambos unos redondeos de radio 3mm.

Estos datos son importantes a la hora de seleccionar herramientas que sean capaces de retirar todo el material. La Figura 26 muestra en detalle donde se encuentran estos radios críticos.

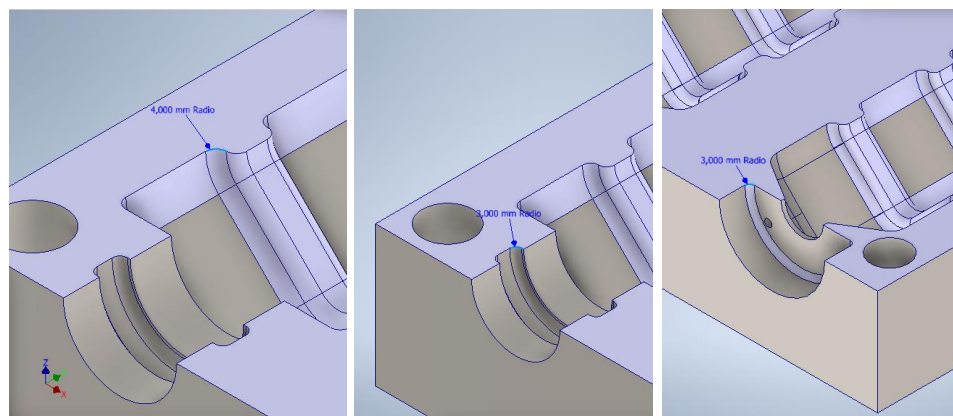


Figura 26: Ubicación de radios críticos

También, debemos prestar atención a las superficies del modelo final: las superficies laterales e inferior no presentan ningún tipo de dificultad ni exigen grandes tolerancias dimensionales ni acabados superficiales. Sin embargo, el acabado la cara superior es crucial, para que ambas mitades del molde apoyen una sobre otra de manera perfecta al cerrarse y no sean la causa de desperfectos en las piezas. También es importante la dimensión Z del molde, ya que definirá la altura del hueco en esa dimensión, afectando tanto al volumen final de las botellas como al espesor de pared resultante al soplar la preforma.

Para finalizar, se ha simulado que el cliente que utilizará este molde para fabricar sus botellas, requiere que aparezca en la propia botella marcado el símbolo normativo que indica el grupo del material del que está fabricado, como se muestra en la Figura 27.

En un boceto 2D, se ha implementará la geometría alámbrica necesaria para poder cumplir con este requerimiento. En la operación de mecanizado específica para esta tarea, se darán más detalles.



Figura 27: Patrón para el grabado de símbolos

### 6.1.2. Tocho de partida

Teniendo en mente todo lo comentado hasta ahora, el próximo paso es definir el tocho de partida.

Para operaciones de conformado por soplado de plásticos, se necesita una conductividad térmica buena, para asegurar que el molde esté a una temperatura uniforme y se evacue adecuadamente el calor que las preformas le transmiten.

Pero, por otro lado, o se necesita un material especialmente duro ni tenaz, ya que el plástico es un material poco abrasivo y la presión de soplado es relativamente baja.

Por los motivos recién descritos, se ha seleccionado un aluminio de la serie 6000, en concreto el 6061-T6. Esta denominación se corresponde con la Norma EN 573-1.

El aluminio 6061, una aleación forjada, es uno de los más frecuentemente usados en la industria, ya que ofrece un equilibrio entre coste y propiedades mecánicas excelente. Además, aunque no es interesante para nuestro caso particular, tiene la cualidad de poder recibir soldadura lo que no deba de ser un valor añadido importante cuando de aluminios de trata.

Por otro lado, el término T6 hace referencia a que ha sido templado artificialmente para obtener la máxima resistencia, mientras que la variante T4, ha sido templada de forma natural y presenta características ligeramente peores.

Los motivos que han llevado a seleccionar el aluminio frente al acero son que las propiedades mecánicas del acero, aunque muy superiores no son necesarias para esta aplicación, mientras que presenta desventajas grandes a la hora de su mecanizado. En la Figura 28 se puede ver una comparativa al respecto:

| PROCEDIMIENTO DE MECANIZADO | TIEMPO EN % - ACERO | TIEMPO EN % - ALUMINIO |
|-----------------------------|---------------------|------------------------|
| Fresado de caras y lados    | 100 %               | 16 %                   |
| Perforación                 | 100 %               | 17 %                   |
| Tiempo de mecanizado total  | 100 % (2h40min)     | 30 % (40min)           |
| Desbaste                    | 100 %               | 20 %                   |
| Acabado                     | 100 %               | 24 %                   |

Figura 28: Comparación de esfuerzos de mecanizado entre acero y aluminio

A continuación, se darán a conocer las características del acero seleccionado, tanto físicas como químicas:

### Propiedades físicas del aluminio 6061-T6

| PROPIEDAD  | VALOR |
|--|-------|
| Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]                        | 2.7   |
| Límite elástico 0,2% [MPa]                           | 270   |
| Tensión de rotura [MPa]                              | 320   |
| Alargamiento a la rotura [%]                         | 11    |
| Resistencia a fatiga en 10 <sup>7</sup> ciclos [MPa] | 95    |
| Dureza Brinell [HB]                                  | 95    |
| Resistividad eléctrica [x10 <sup>-6</sup> Ω · m]     | 0.04  |
| Conductividad térmica [W/m · k]                      | 170   |
| Máxima temperatura (sólido) [°C]                     | 580   |
| Resistencia a la corrosión                           | Buena |
| Soldabilidad   | Buena |

### Composición química del aluminio 6061-T6

| ALEANTE   | %                                     |
|-----------|---------------------------------------|
| Magnesio  | 0.8 - 1.2                             |
| Silicio   | 0.4 - 0.8                             |
| Hierro    | 0 - 0.7                               |
| Cobre     | 0.15 - 0.4                            |
| Manganeso | 0 - 0.15                              |
| Cromo     | 0.04 - 0.35                           |
| Zinc      | 0 - 0.25                              |
| Titanio   | 0 - 0.15                              |
| Otros     | Max 0.05 de cada<br>Max 0.15 en total |

#### 6.1.3. Creación de una fase

Tras abrir el archivo .stp que contiene la geometría del molde a obtener, el siguiente paso es crear la fase necesaria para indicar la operación a realizar y la máquina empleada, el material del tocho, sus dimensiones y poder referenciar las operaciones de mecanizado.

Una vez abierto el menú de “configuración”, iremos introduciendo la información correspondiente en cada pestaña, como se muestra en conjunto a continuación, en la Figura 29.

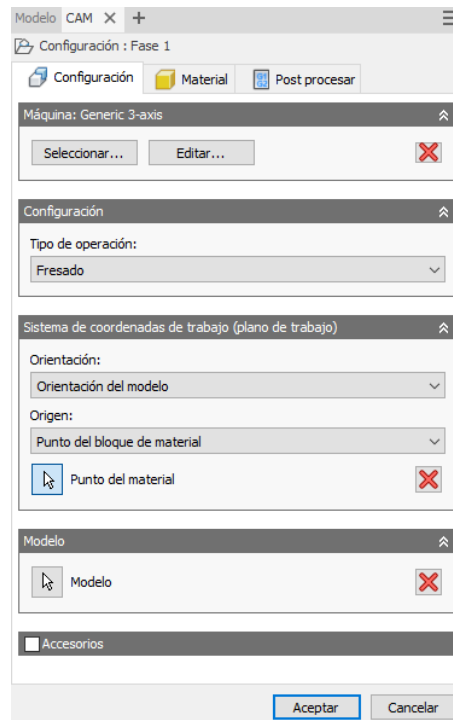


Figura 29: Pestaña "configuración" en la creación de una fase

En la primera, llamada "configuración", introducimos los siguientes datos:

- Máquina: Genérica de 3 ejes
- Tipo de operación: Fresado
- Orientación: Seleccionamos el origen del sistema de coordenadas de trabajo coincidiendo con el del modelo, verificando que quede el eje Z hacia arriba y perpendicular a la cara superior del molde. El punto de partida es una esquina del tocho de partida, seleccionado manualmente.
- Modelo: Seleccionamos la pieza final.
- Accesorios: En este caso no se activará este paquete de opciones por no ser necesarios para nuestro conjunto de operaciones, pero aquí encontraríamos los campos para indicar los elementos de sujeción del tocho.

En la segunda pestaña, denominada "material", definiremos la geometría del tocho. Teniendo presente lo comentado en capítulos anteriores, no indicaremos material extra ni en los laterales ni en la parte inferior, pero sí en la cara superior, 3mm de sobrematerial. Ver Figura 30.

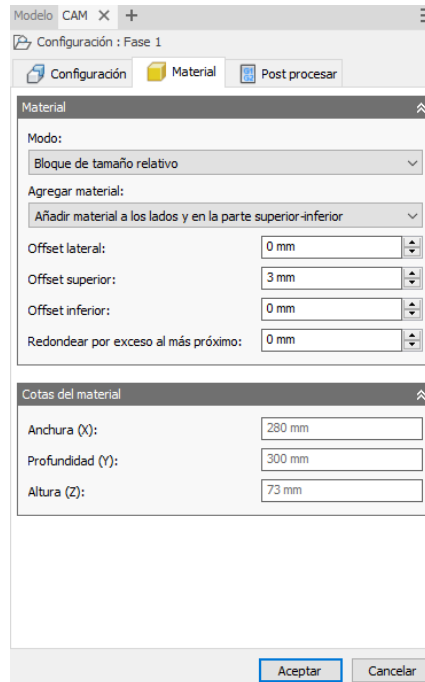


Figura 30: Pestaña "materia" en la creación de una fase

En la tercera pestaña, correspondiente al “postprocesado”, no haremos nada en este momento, ya que se rellenarán estos campos más adelante.

Tras aceptar, ya veremos en nuestro árbol de trabajo CAM la nueva fase, pero denominada como “Configuración1”. Le cambiaremos el nombre haciendo un doble clic rápido sobre el texto y escribiremos “Fase 1” en su lugar. En la Figura 31 se puede ver el aspecto sobre el modelo 3D y también se pueden apreciar los perímetros que se han dibujado para delimitar las zonas que tienen radios de redondeo mínimos distintos.

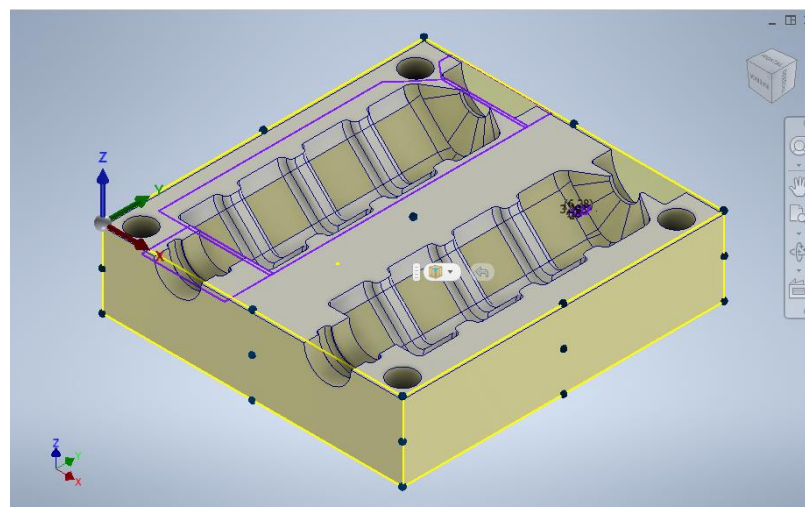


Figura 31: Resultado final de la creación de la fase

## 6.2. Selección de herramientas

A continuación, seleccionaremos las herramientas que consideremos más apropiadas para la geometría, tamaño y material del tocho. Por lo general, es aconsejable dejarse orientar por las indicaciones dan los fabricantes en sus catálogos.

En nuestro caso, hemos recurrido a dos fabricantes diferentes, Sandvik para la herramienta de planeado, tanto portaplaquitas como las propias plaquitas de corte, e ISCAR para las herramientas enterizas.

En el caso de Sandvik, el fabricante pone a nuestra disposición la herramienta “Toolguide”, que selecciona la herramienta automáticamente tras introducir los datos relativos a la operación y la máquina utilizada.

En cuanto a ISCAR la selección se ha hecho directamente descargando los catálogos que tienen disponibles en su web. Para ello, se ha consultado el tipo de material del tocho con respecto a la clasificación ISO, siendo todos los aluminios categoría ISO N.

ISCAR, sin embargo, va un paso más allá y diferencia entre varios tipos de aleaciones y/o tratamientos térmicos dentro de cada clase ISO. Como se puede observar en la Figura 32, nuestro aluminio está nombrado por ISCAR como material del tipo 22, correspondiente a aleaciones de aluminio forjadas endurecidas (en nuestro caso por un proceso de templeado).

**Machining Data for Solid Carbide and MULTI-MASTER Endmills**

| ISO   | Material   | Condition                          | Tensile Strength [N/mm <sup>2</sup> ] | Hardness HB | Material No. | Cutting Speed (m/min) |         |         |         |         |
|---|--|------------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
|   |  |                                    |                                       |             |              | IC900/IC608           | IC903   | IC300   | IC08    |         |
| P   | Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel           | < 0.25 %C<br>Annealed              | 420                                   | 125         | 1            | 260-280               | 260-280 | 210-220 | 180-200 |         |
|   |  | >= 0.25 %C<br>Annealed             | 650                                   | 190         | 2            | 200-230               | 200-230 | 160-180 | 140-160 |         |
|   |  | < 0.55 %C<br>Quenched and tempered | 850                                   | 250         | 3            | 160-220               | 160-220 | 130-180 | 110-150 |         |
|   |  | >= 0.55 %C<br>Annealed             | 750                                   | 220         | 4            | 160-220               | 160-220 | 130-180 | 110-150 |         |
|   | Low alloy and cast steel (less than 5% of alloying elements) | Quenched and tempered              |                                       | 1000        | 300          | 5                     | 140-180 | 140-180 | 110-140 | 100-130 |
|   |  |                                    | Annealed                              | 600         | 200          | 6                     | 160-220 | 160-220 | 130-180 | 110-150 |
|   |  | Quenched and tempered              |                                       | 930         | 275          | 7                     | 120-180 | 120-180 | 100-140 | 80-130  |
|   |  |                                    |                                       | 1000        | 300          | 8                     | 130-180 | 130-180 | 100-140 | 90-130  |
|   |  |                                    |                                       | 1200        | 350          | 9                     | 140-180 | 140-180 | 110-140 | 100-130 |
|   |  |                                    |                                       | 1100        | 325          | 11                    | 70-120  | 70-120  | 60-100  | 50-80   |
| High alloyed steel, cast steel and tool steel | Annealed   | 680                                | 200                                   | 10          | 130-180      | 130-180               | 100-140 | 90-130  |         |         |
|   | Quenched and tempered  | 1100                               | 325                                   | 11          | 70-120       | 70-120                | 60-100  | 50-80   |         |         |
| Stainless steel and cast steel                | Ferritic/martensitic   | 680                                | 200                                   | 12          | 80-160       | 80-160                | 60-130  | 60-110  |         |         |
|   | Martensitic  | 820                                | 240                                   | 13          | 60-150       | 60-150                | 50-120  | 40-100  |         |         |
| M   | Stainless steel and cast steel                               | Austenitic                         | 600                                   | 180         | 14           | 60-120                | 60-120  | 50-100  | 40-80   |         |
| K   | Grey cast iron (GG)  | Ferritic/pearlitic                 | 180                                   | 15          | 15           | 80-260                | 80-250  | 60-210  | 60-180  |         |
|   |  | Pearlitic/martensitic              | 260                                   | 16          | 16           | 130-240               | 130-240 | 100-190 | 90-170  |         |
|   | Cast iron nodular (GGG)                                      | Ferritic                           | 160                                   | 17          | 17           | 150-280               | 150-270 | 120-220 | 100-200 |         |
|   |  | Pearlitic                          | 250                                   | 18          | 18           | 90-280                | 90-270  | 70-220  | 60-200  |         |
| Malleable cast iron                           | Ferritic   | 130                                | 19                                    | 19          | 150-280      | 150-270               | 120-220 | 100-200 |         |         |
|   | Pearlitic  | 230                                | 20                                    | 20          | 140-240      | 140-240               | 110-190 | 100-170 |         |         |
| N   | Aluminum-wrought alloys                                      | Not cureable                       | 60                                    | 21          | 21           |                       |         |         | 800-900 |         |
|   |  | Cured                              | 100                                   | 22          | 22           |                       |         |         | 700-800 |         |
|   | Aluminum-cast-alloys   | <=12% Si<br>Not cureable           | 75                                    | 23          | 23           |                       |         |         | 800-900 |         |
|   |  | >12% Si<br>Cured                   | 90                                    | 24          | 24           |                       |         |         | 750-850 |         |
|   | Copper alloys  | >1% Pb<br>High temperature         | 130                                   | 25          | 25           |                       |         |         | 400-450 |         |
|   |  | Free cutting                       | 110                                   | 26          | 26           |                       |         |         | 500-550 |         |
|   |  | Brass                              | 90                                    | 27          | 27           |                       |         |         | 500-550 |         |
|   |  | Electrolic copper                  | 100                                   | 28          | 28           |                       |         |         | 350-380 |         |
| Non-metallic                                  | Duroplastics, fiber plastics                                 |                                    | 29                                    | 29          |              |                       |         |         |         |         |
|   | Hard rubber  |                                    | 30                                    | 30          |              |                       |         |         |         |         |

Figura 32: Clasificación de materiales en el catálogo de ISCAR



También nos indica el fabricante en la misma tabla que para este material, las herramientas de corte compatibles son las categorizadas como IC08 y nos da un rango de velocidades de corte de entre 700 – 800 m/min.

En este punto, procedemos a crear una biblioteca personalizada de herramientas de la manera que se expuso en el capítulo 5.2.2., y procedemos a introducir la información que necesita Inventor para parametrizar las herramientas.

Se muestran a continuación dos ejemplos, uno con la herramienta de Sandvik y otro con una de las seleccionadas de ISCAR, para ilustrar las diferencias para obtener la información de una u otra manera.

Toda la información de las herramientas utilizadas puede consultarse, tras las conclusiones y la bibliografía, en el Anexo I.

### Fresa planeadora de Sandvik

En este caso, la herramienta Toolguide permite descargar un informe PDF con toda la información relativa a la herramienta y a los parámetros de corte, por lo que tan solo deberemos buscar en ese informe los datos que el programa solicita. En la Figura 33 se muestra una parte del mencionado informe para ejemplificar lo que se expone.

Datos de corte

Leyenda

- 1 Pre-mecanizado
- 2 Acabado

|  | 1         | 2         |                      |
|--|-----------|-----------|----------------------|
| Empañe de trabajo (AE)                           | 100       | 100       | mm                   |
| Profundidad de corte (AP)                        | 2.5       | 0.5       | mm                   |
| Número de pasadas en dirección AE (NOPAE)        | 2         | 2         | NOPae                |
| Número de pasadas en dirección AP (NOPAP)        | 1         | 1         | NOPap                |
| Velocidad de corte (VC)                          | 845       | 924       | m/min                |
| Velocidad del husillo (N)                        | 2070      | 2330      | 1/min                |
| Avance por diente (FZ)                           | 0.24      | 0.153     | mm                   |
| Velocidad de avance en diámetro mecanizado (VFM) | 5970      | 4300      | mm/min               |
| Potencia de corte (PPC)                          | 18.1      | 2.92      | kW                   |
| Par de corte (MMC)                               | 83.7      | 12        | Nm                   |
| Grosor máximo de virutas (HEX)                   | 0.17      | 0.108     | mm                   |
| Velocidad de eliminación de material (QQ)        | 1490      | 215       | cm <sup>3</sup> /min |
| Tiempo de corte total (TCCT)                     | 00:05.274 | 00:09.060 | min:s                |
| Tiempo sin corte total (TNCT)                    | 00:00.394 | 00:00.487 | min:s                |
| Longitud de vida útil de la herramienta (TLIFEL) | 216.72    | 123.82    | m                    |
| Tiempo de vida útil de la herramienta (TLIFET)   | 36        | 29        | min                  |

Figura 33: Informe generado por la herramienta de Sandvik

Una vez hemos presionado el botón en Inventor para crear una nueva herramienta dentro de la biblioteca, se abre una ventana con varias pestañas. La primera es la denominada “General”, mostrada en la Figura 34, Es buena praxis añadir en estos campos información suficiente para que, llegado el caso de que empiece a haber muchas herramientas de la misma tipología y con el mismo diámetro, estas puedan distinguirse.

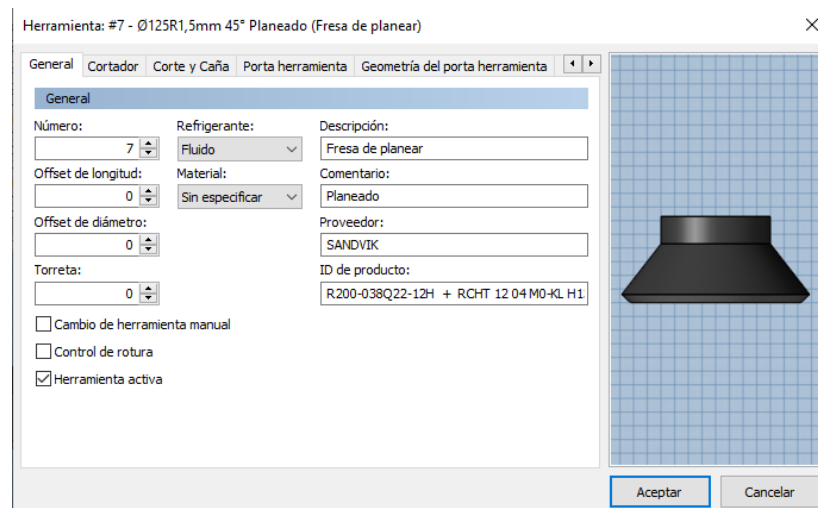


Figura 34: Pestaña "general" al introducir una nueva herramienta

En la pestaña “cortador”, seccionaremos en un desplegable el tipo de herramienta que queremos grabar, lo cual habilitará u ocultará los campos pertinentes de forma automática para realizar una definición correcta de la herramienta. En la Figura 35 se pueden apreciar cómo se ha procedido este ejemplo.

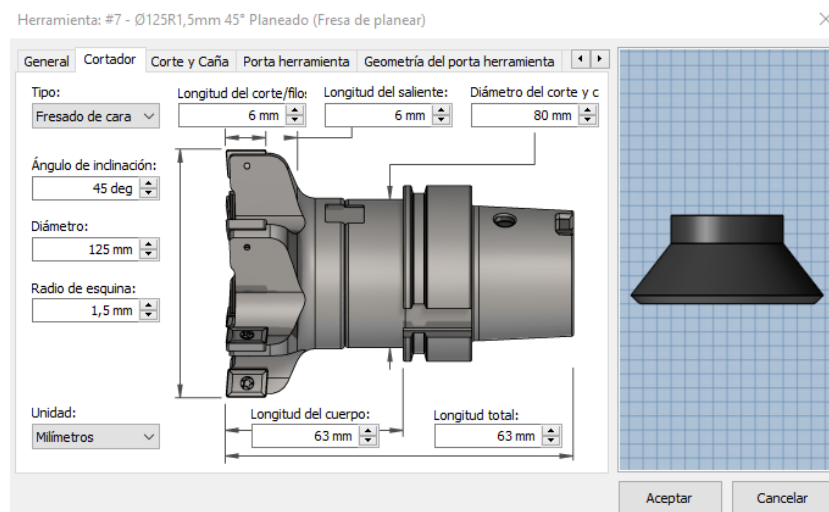


Figura 35: Pestaña "cortador" al introducir una nueva herramienta

La pestaña “corte y caña” ofrece campos adicionales que permiten añadir detalle a la geometría de la fresa si no fuese suficiente con la que se puede introducir en la anterior, como es el caso de la planeadora, donde en la Figura 36 se observa cómo se ha introducido la información adicional para intentar que la representación de la fresa sea o más realista posible.

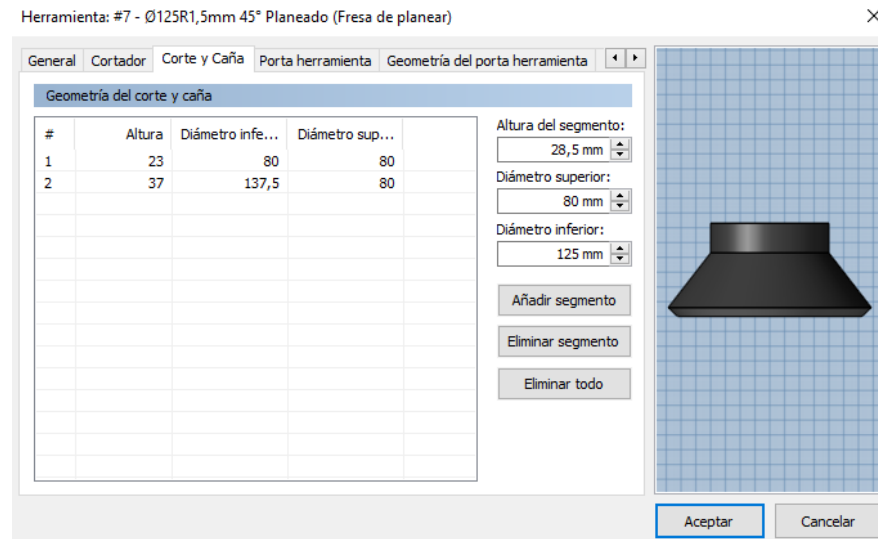


Figura 36: Pestaña "corte y caña" al introducir una nueva herramienta

Para concluir la definición de la herramienta, entraremos en la pestaña “Avance y velocidad”, que se muestra en la Figura 37. Será aquí donde hagamos uso de los parámetros que recomienda o calcula, como en el caso de Sandvik, el fabricante.

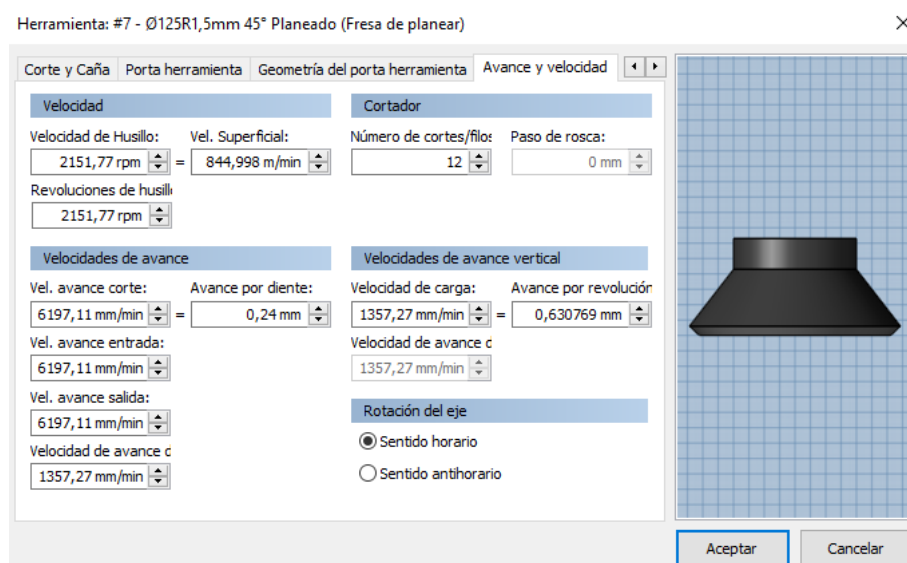


Figura 37: Pestaña "alcance y velocidad" al introducir una nueva herramienta

Las pestañas “porta herramienta” y “Geometría del portaherramienta” que hemos pasado de largo, al igual que comentamos en el caso de los sistemas de agarre del tocho, no tienen utilidad, puesto que todas las fresas seleccionadas tienen un voladizo superior a la profundidad máxima que se requiere.

### Fresa de desbaste pesado de ISCAR

El proceso de configuración de la herramienta es el mismo en este caso, por lo que se evitará repetir las explicaciones dadas anteriormente, así como las figuras que las acompañaban por ser el proceso idéntico.

Sin embargo, lo que se quiere resaltar con este ejemplo, es la manera más tradicional de obtener todos los datos de la herramienta. En la Figura 38 se puede ver extraída la página del catálogo donde aparece la herramienta seleccionada resaltada. La tabla ofrece todos los parámetros geométricos de la herramienta directamente, que se pueden interpretar junto con la representación superior que acompaña la tabla.

**CHATTERFREE**  
**ECA-H3-CF**  
 Solid Carbide Endmills with Different Flute, Variable Pitch, and Ramped Neck for Machining Aluminum

| Designation                  | Dimensions |         |       |        |       |       |         |          |       |       |       | Tough     |  | Hard<br>HRC | Recommended<br>Machining Data<br>f<br>(mm/s) |
|------------------------------|------------|---------|-------|--------|-------|-------|---------|----------|-------|-------|-------|-----------|--|-------------|--|
|                              | DC         | DCO/NMS | AP/MX | OAL    | NOF1* | LU    | RMP/K1* | Shaft RE | IC108 | IC109 | IC110 |           |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.2  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.2D | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.8  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R1.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R2.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R2.5  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R3.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R3.5  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.2D | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.8  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R1.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R2.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R2.5  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R3.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-18.0 AC12 CF-R0.8  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | —     | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.2  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.2D | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.8  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R1.6  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.5  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.5  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 400    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R4.0  | 12.00      | 12.00   | 8.00  | 85.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 500    | ●     | ●     | ●     | 0.04-0.11 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.2  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.8  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R1.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.5  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.5  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 400    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R4.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 500    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.2  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R0.8  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R1.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R2.5  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R3.5  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 400    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-24.0 AC12 CF-R4.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 128.00 | 3     | 8.00  | 5.0     | C 500    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R0.2  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R0.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R0.8  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R1.6  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R2.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R2.5  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R3.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 12-32.0 AC12 CF-R4.0  | 16.00      | 16.00   | 8.00  | 82.00  | 3     | 8.00  | 5.0     | C 400    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.13 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R0.2  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 020    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R0.6  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 040    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R0.8  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 080    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R1.6  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 160    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R2.0  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 200    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R2.5  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 250    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R3.0  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 300    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |
| ECA-H3 20-30.0 AC20 CF-R4.0  | 20.00      | 20.00   | 8.00  | 100.00 | 3     | 10.00 | 5.0     | C 400    | ●     | ●     | ●     | 0.05-0.14 |  |             |  |

\* For user guides, see page 103 \* Grade IC1 909 - DLC Coating  
 # Number of flutes  
 # Maximum ramping angle  
 # Co-Optimized

Scan the QR code for additional information.  
 Enter the item description in the search field to access additional related data.

Figura 38: Página extraída del catálogo de ISCAR

Debemos prestar atención a tres detalles:

- 1- La herramienta seleccionada esté marcada como categoría IC08, lo que significa que es compatible con el material de nuestro tocho.
- 2- A la derecha, en esta familia de herramientas se ofrece información específica de la velocidad de avance por revolución, pero no velocidades de corte recomendadas.
- 3- Debajo de la tabla, se indica que la guía de usuario se encuentra en la página 103 del manual. Esta página contiene la información que se muestra en la Figura 39.

| D 2x ROUGH: AE = 40% - Full Cut , $A_p = 1.5xDC^*$ |                   |                |              |                     |              |  |
|--|-------------------|----------------|--------------|---------------------|--------------|--|
| Material Group Parameters                          | Alu Wrought Alloy | Alu Cast Alloy | Copper Alloy | Electrolytic Copper | Non-Metallic |  |
|  | 21-22             | 23-25          | 26-27        | 28                  | 29-30        |  |
| $V_c$ (IC08) (m/min)                               | 700-760           | 400-550        | 500-520      | 350-360             | 350-360      |  |
| $F_z$ (Ø6-8) (mm/t)                                | 0.02-0.04         | 0.02-0.04      | 0.02-0.04    | 0.02-0.04           | 0.02-0.04    |  |
| $F_z$ (Ø10-12) (mm/t)                              | 0.03-0.05         | 0.03-0.05      | 0.03-0.05    | 0.03-0.05           | 0.03-0.05    |  |
| $F_z$ (Ø 16-20) (mm/t)                             | 0.03-0.07         | 0.03-0.07      | 0.03-0.07    | 0.03-0.07           | 0.03-0.07    |  |

| SEMI-FINISH: AE = 10% - 40%, $A_p = 2 x DC$ |                   |                |              |                     |              |  |
|---|-------------------|----------------|--------------|---------------------|--------------|--|
| Material Group Parameters                   | Alu Wrought Alloy | Alu Cast Alloy | Copper Alloy | Electrolytic Copper | Non-Metallic |  |
|   | 21-22             | 23-25          | 26-27        | 28                  | 29-30        |  |
| $V_c$ (IC08) (m/min)                        | 760-840           | 550-700        | 520-530      | 360-370             | 360-370      |  |
| $F_z$ (Ø6-8) (mm/t)                         | 0.04-0.06         | 0.04-0.06      | 0.03-0.05    | 0.03-0.05           | 0.03-0.05    |  |
| $F_z$ (Ø 10-12) (mm/t)                      | 0.06-0.08         | 0.06-0.08      | 0.045-0.055  | 0.045-0.055         | 0.045-0.055  |  |
| $F_z$ (Ø 16-20) (mm/t)                      | 0.08-0.1          | 0.08-0.1       | 0.055-0.07   | 0.055-0.07          | 0.055-0.07   |  |

| FINISH / H.S.M: AE = 5% - 10%, $A_p = \text{Max. Cutting Length}$ |                   |                |              |                     |              |  |
|---|-------------------|----------------|--------------|---------------------|--------------|--|
| Material Group Parameters   | Alu Wrought Alloy | Alu Cast Alloy | Copper Alloy | Electrolytic Copper | Non-Metallic |  |
|   | 21-22             | 23-25          | 26-27        | 28                  | 29-30        |  |
| $V_c$ (IC08) (m/min)  | 840-900           | 700-900        | 530-550      | 370-380             | 370-380      |  |
| $F_z$ (Ø6-8)(mm/t)  | 0.045-0.07        | 0.045-0.07     | 0.035-0.06   | 0.035-0.06          | 0.035-0.06   |  |
| $F_z$ (Ø10-12) (mm/t)   | 0.07-0.1          | 0.07-0.1       | 0.06-0.07    | 0.06-0.07           | 0.06-0.07    |  |
| $F_z$ (Ø16-20) (mm/t)   | 0.1-0.15          | 0.1-0.15       | 0.065-0.08   | 0.065-0.08          | 0.065-0.08   |  |

Figura 39: Guía de usuario de ISCAR para seleccionar los parámetros de corte

En esta tabla, se dan las velocidades de corte en función del tipo de pasada (desbaste, semiacabado, acabado final), en función del código de material (recordemos que el nuestro lo habíamos enmarcado como 22) y también, en función del diámetro de la herramienta, el avance por revolución recomendado.

Adicionalmente, se ofrece información de gran utilidad como la relación entre el diámetro de la herramienta que esté cortando material con el uso de la longitud del filo de la herramienta, en función del tipo de pasada que se esté llevando a cabo.

Una vez tenemos hemos identificado nuestro caso particular dentro de la tabla, podemos extraer los datos de velocidad de corte y avances necesarios para configurar la herramienta correctamente.

Como nota final, algunas de las herramientas seleccionadas, no referían a la guía de usuario de la Figura 39, si no a la mostrada anteriormente en la Figura 32, en donde solo se indica la velocidad de corte, por lo que el avance por revolución se ha obtenido según las recomendaciones de esta otra guía cuando no estaba específicamente indicado en la tabla de características geométricas de la herramienta.

Con el resto de las herramientas se procedería de la misma forma para introducirlas en nuestra biblioteca personalizada de Inventor. Como se ha comentado, todos los datos necesarios se encuentran en el Anexo I.

### 6.3. Programación de las estrategias de mecanizado

En este capítulo, nos centraremos en el siguiente paso del proceso, que es la programación de las diferentes operaciones de mecanizado necesarias para alcanzar la geometría final.

Teniendo presente el análisis de la geometría que hicimos anteriormente, vamos a realizar unas operaciones de apoyo previas al mecanizado del molde.

Separaremos las áreas de mecanizado en función del menor radio de cada una, para buscar la herramienta óptima en cada caso.

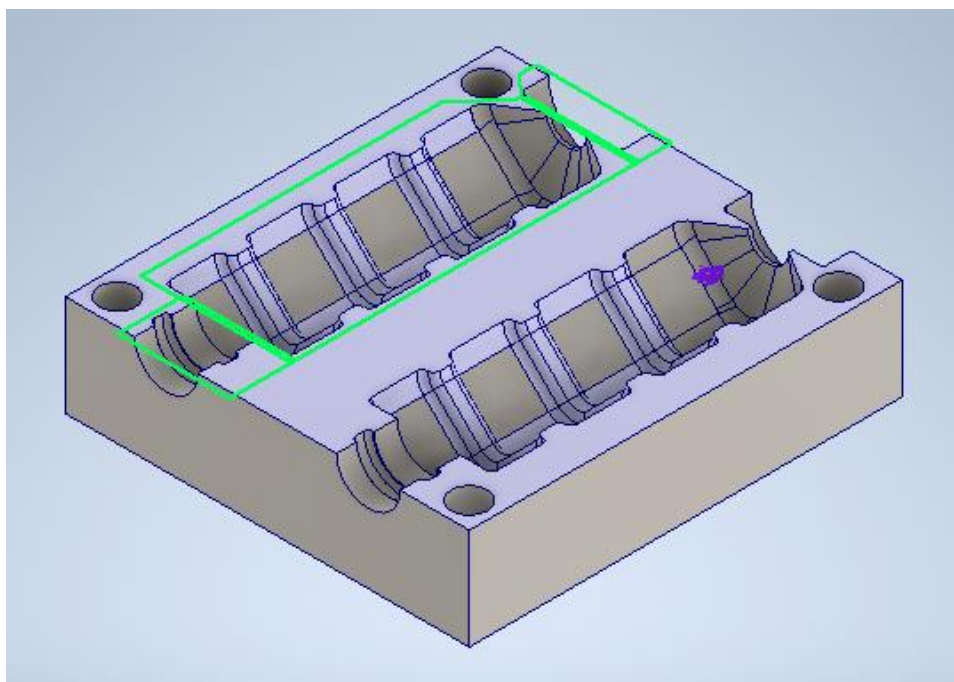


Figura 40: Bocetos de apoyo

En la Figura 40 se puede apreciar los bocetos 2D que se han implementado sobre el modelo 3D importado con este fin. Se han solapado unas zonas con otras y no se ha utilizado el contorno de las cavidades para asegurar que se retira todo el material, ya que es posible que, en función de las opciones seleccionadas, la herramienta no pueda pasar justo por el borde del área de mecanizado indicada en cada caso.

Por último, vamos a crear una carpeta dentro de la “Fase 1” para cada conjunto de operaciones que se realicen con una misma herramienta. Como veremos más tarde, esto será de gran ayuda para simplificar la programación de las estrategias de mecanizado.

Para ello, tras hacer clic derecho sobre “Fase 1” en el árbol de operaciones, seleccionaremos “nueva carpeta” y le daremos un nombre adecuado.

### 6.3.1. Planeado de la cara de contacto

La primera operación que programaremos será un paneado, aplicado sobre la cara superior del molde, para retirar los 3mm de material adicional que tiene el tocho. Con esta operación, nos aseguramos la tolerancia dimensional del molde y cumplir con las tolerancias de planicidad de la cara de contacto y la perpendicularidad con respecto a las caras laterales.

Para ello, seleccionaremos la opción “Planeado” dentro del panel “Fresado 2D”, momento en el cual se abrirá una ventana con varias pestañas y campos en cada una de ellas para introducir la información de la operación, como se explicó en el capítulo 5.2.3.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas. Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionamos la fresa adecuada, en este caso la de planear.

Como vemos en la Figura 41, toda la información de avances y velocidades de corte se importa automáticamente, aunque es este punto podríamos modificar cualquiera de los parámetros para esta operación concreta si fuera necesario, sin afectar a los datos guardados en la herramienta.

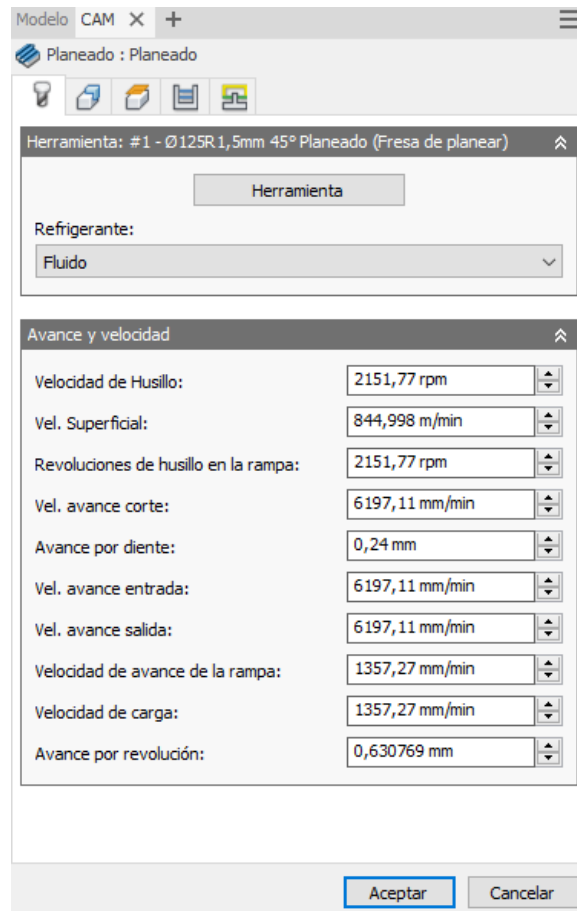


Figura 41: Pestaña "herramienta" en la operación de planeado

En la pestaña "geometría", tan solo debemos ubicar el cursor sobre la cara superior de la pieza, e Inventor detectará automáticamente los contornos exteriores de esa superficie. Una vez lo verifiquemos, haciendo clic, quedará correctamente seleccionada el área de mecanizado, como se muestra en la Figura 42.

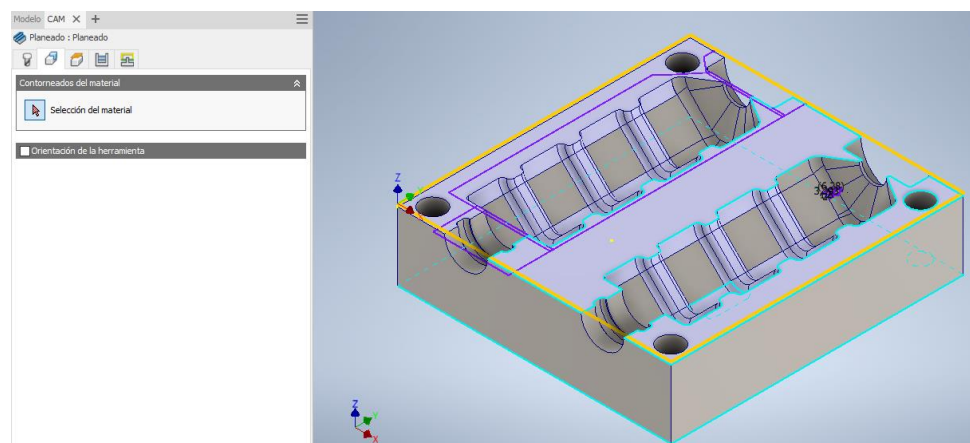


Figura 42: Pestaña "geometría" en la operación de fresado



El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los siguientes parámetros:

- Altura de seguridad: Seleccionamos altura de retracción y un offset de 50mm con respecto a esta.
- Altura de retracción: Seleccionamos altura del material y un offset de 10mm con respecto a esta.
- Altura del avance: Seleccionamos altura superior y un offset de 5mm con respecto a esta
- Altura superior: Seleccionamos parte superior del material y un offset de 0mm con respecto a esta. Importante seleccionar la parte superior del material, es decir, del tocho de partida.
- Altura inferior: Seleccionamos parte superior del modelo y un offset de 0mm con respecto a esta. Importante este parámetro para que el planeado no se extienda más allá del plano en el que queremos que finalice.

En la Figura 43 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

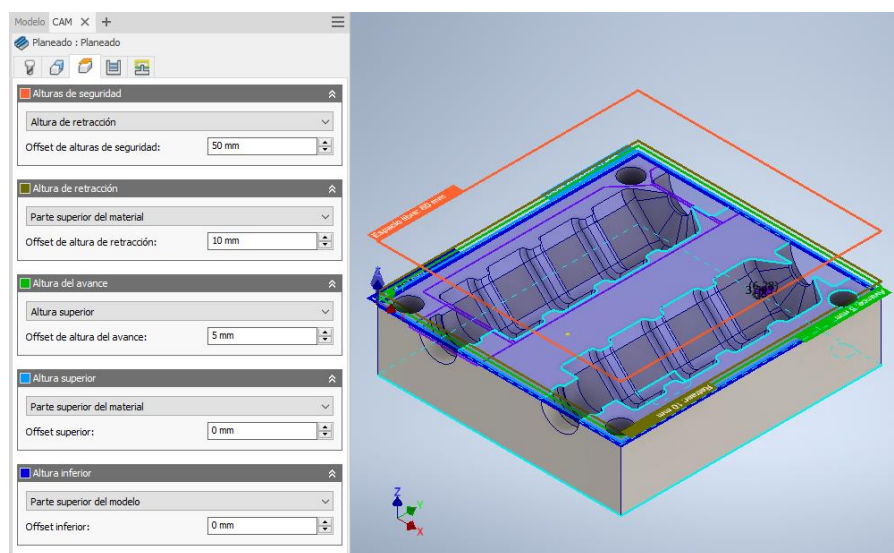


Figura 43: Pestaña "alturas" en la operación de planeado

En la pestaña “pasadas” indicaremos al programa la manera de realizar el mecanizado para asegurarnos, por un lado, de eliminar por completo el material sobrante y, por otro lado, de que la calidad superficial y las tolerancias requeridas son alcanzadas.

Para ello, activaremos el menú “varias profundidades”, indicando que queremos una pasada de acabado de máximo 0,5mm de profundidad, siendo las de desbaste de profundidad uniforme y de máximo 2mm.

En este punto indicaremos que para la pasada de acabado la velocidad de avance es diferente, introduciendo la que nos indica el fabricante, en este caso 924 mm/min.

También debemos asegurarnos de no activar el menú “sobrematerial”, puesto que no hay más operaciones posteriores sobre esta superficie. En la Figura 44, se puede ver todo lo descrito en los anteriores párrafos.

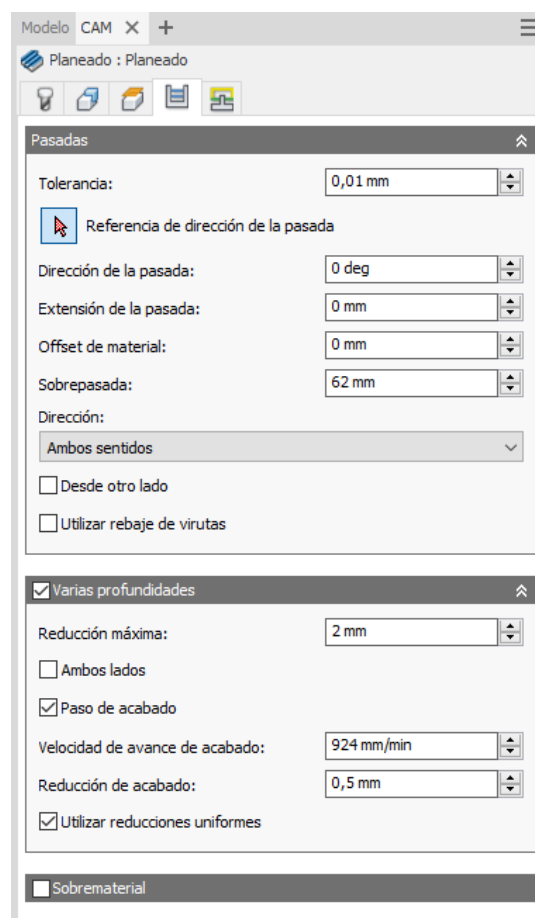
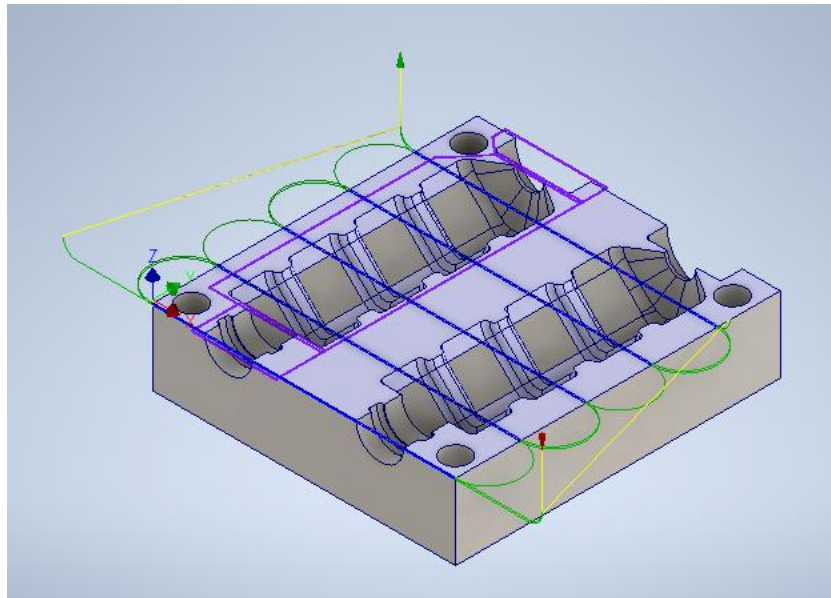


Figura 44: Pestaña "pasadas" de la operación de planeado

Finalmente, en la pestaña “Vinculación”, mantendremos los valores por defecto.

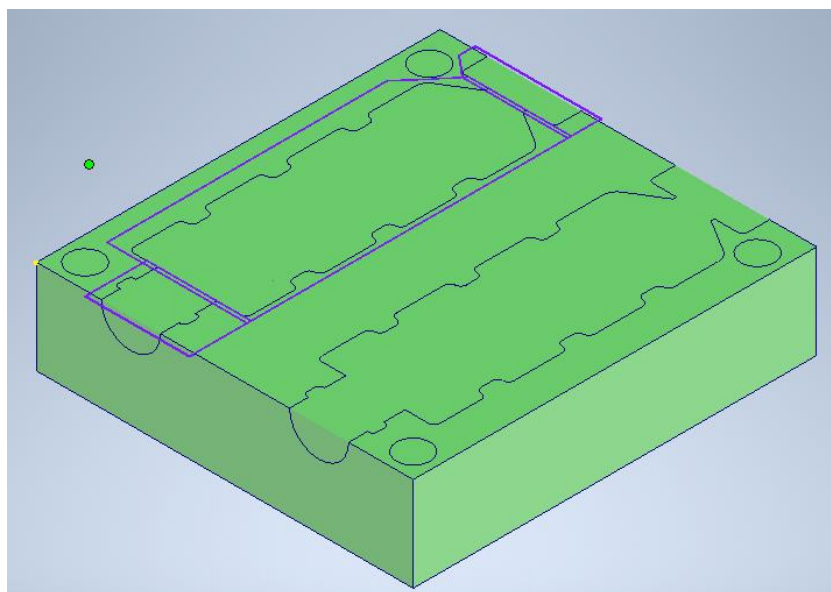
Pulsamos sobre el botón “aceptar” de la ventana de configuración de la operación de planeado y automáticamente esta aparecerá en el árbol de operaciones CAM y se iniciará su cálculo de rutas de la herramienta.

Si la seleccionamos, en pantalla se nos mostrarán todas las rutas necesarias para completar la operación (ver Figura 45) y, manteniendo seleccionada la operación, podemos lanzar el módulo de simulación para verificar que no existen errores como colisiones con material a respetar del modelo final, zonas sin mecanizar, etc.



*Figura 45: Rutas para la operación de planeado*

En la Figura 46 se muestra el estado de la pieza tras esta primera operación. Se han necesitado 2:28 minutos para completarse.



*Figura 46: Estado del tocho tras la operación de planeado*

### 6.3.2. Taladrado de los alojamientos de los tetones

La segunda operación que programaremos será el taladrado de los agujeros que alojarán los tetones, que la realizaremos con una fresa en vez de con una broca puesto que la rugosidad superficial que quedará tras la operación será mucho más fina, algo que no es baladí a tenor de lo antes expuesto.

Para ello, seleccionaremos la opción “Cajera” dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo la misma ventana con la misma estructura de pestañas que en el caso anterior, pero con las modificaciones propias de esta operación.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas. Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionados la fresa adecuada, en este caso la fresa plana de 8mm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 47.

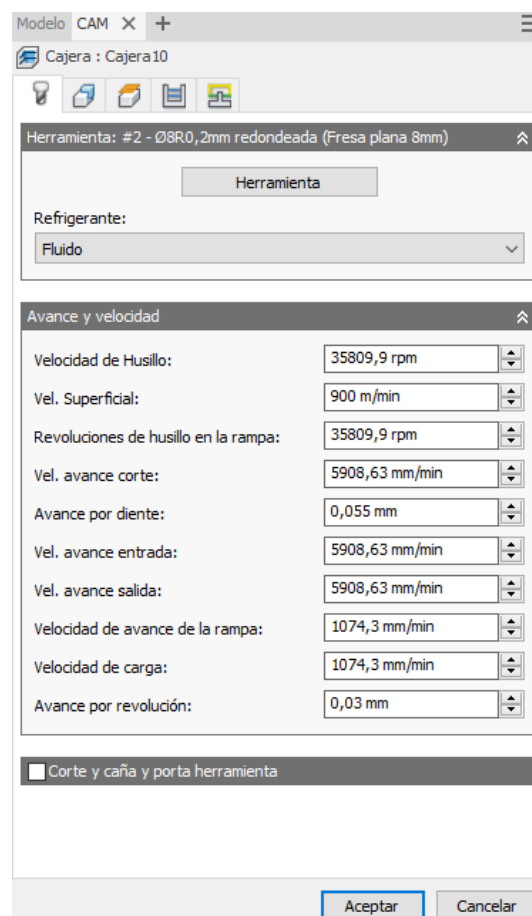


Figura 47: Pestaña "herramienta" en la operación de taladrado

En la pestaña “geometría”, debemos elegir el modo “selección” dentro de las opciones “contorno de mecanizado” y seleccionar la circunferencia superior. También activaremos el menú “redesbaste”, para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se muestra en la Figura 48.

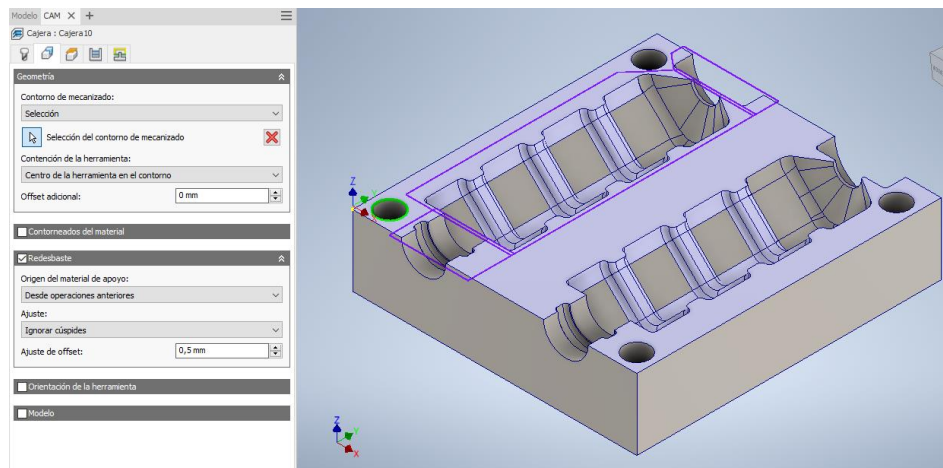


Figura 48: Pestaña "geometría" en la operación de taladrado

El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los siguientes parámetros:

- Altura de seguridad: Seleccionamos altura de retracción y un offset de 50mm con respecto a esta.
- Altura de retracción: Seleccionamos altura del material y un offset de 10mm con respecto a esta.
- Altura del avance: Seleccionamos altura superior y un offset de 5mm con respecto a esta
- Altura superior: Seleccionamos parte superior del material y un offset de 0mm con respecto a esta.
- Altura inferior: Seleccionamos parte inferior del modelo y un offset de 0mm con respecto a esta. En esta ocasión si queremos que se tenga en cuenta la altura total del modelo, para que mecanice toda la profundidad de este.

En la Figura 49 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

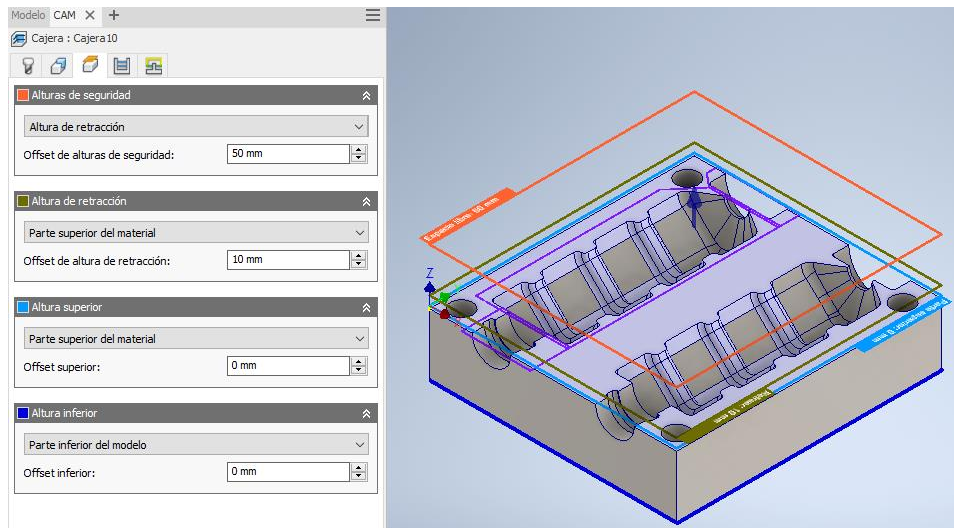


Figura 49: Pestaña "alturas" en la operación de taladrado

En la pestaña "pasadas" tan solo introduciremos el valor de la altura de corte máxima de la herramienta en el campo "reducción de desbaste máxima", para permitir al programa utilizar todo el filo de la herramienta, desgastándola por igual y alargando su duración. En este caso, 12mm.

Activaremos la opción "detección de área plana", puesto que estos taladros tienen dos diámetros (el superior mayor que el inferior), generando una cara plana en el interior de la pieza.

Esta opción habilita que el software las intente detectar para adaptar las profundidades de corte al número óptimo para reducir el tiempo de mecanizado.

También debemos asegurarnos, al igual que en la operación anterior, de no activar el menú "sobrematerial", puesto que no hay más operaciones posteriores sobre estas superficies.

Por último, activaremos el menú suavizado con el objetivo principal de aligerar el código resultante, lo que será de gran ayuda a la hora de generarlo.

En la Figura 50, se puede ver como quedaría configurada finalmente esta pestaña.

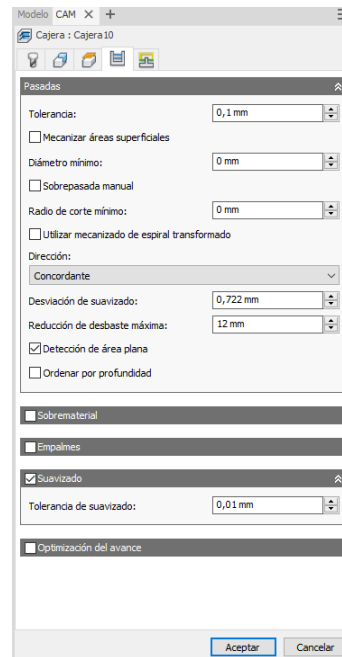


Figura 50: Pestaña "pasadas" en la operación de taladrado

Por último, en la pestaña "Vinculación", dentro del campo "rampa", elegiremos "hélice" y ajustaremos el ángulo de descenso al máximo que permite la herramienta para reducir el tiempo de mecanizado, como aparece en la Figura 51.

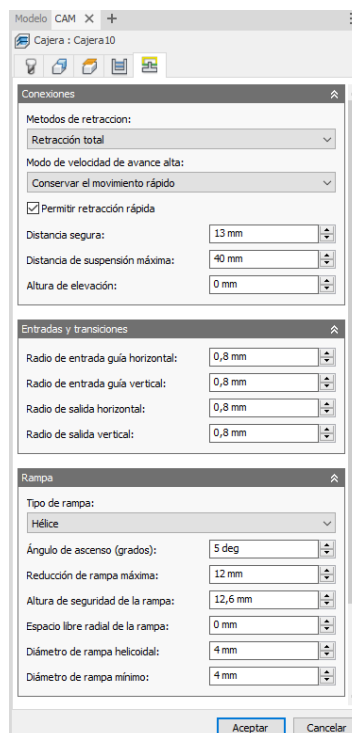


Figura 51: Pestaña "vinculación" de la operación de taladrado

Como el lector habrá podido observar, en vez de seleccionar los 4 diámetros correspondientes a los taladros, solo se seleccionó 1.

Esto es debido a que se ha optado por crear un patrón bidimensional con las cotas X e Y que separan los taladros sobre el mecanizado del primero, debido a que, de esta manera, el cálculo de las rutas se realiza una sola vez, y solo se cuadruplica su ejecución para las posiciones adecuadas, en vez de tener que calcular todas las rutas como si fuesen una sola operación, algo mucho más costoso a nivel computacional, requiriendo prácticamente el mismo esfuerzo de seleccionar los 4 agujeros sobre el modelo 3D.

La forma de generar un patrón es la siguiente: seleccionada la operación a la que se quiere aplicar el patrón, con clic derecho el programa nos muestra diferentes opciones, entre las que se encuentra “añadir a un nuevo patrón”, donde introduciendo la información mostrada en la Figura 52, lo generaremos adecuado a nuestras necesidades.

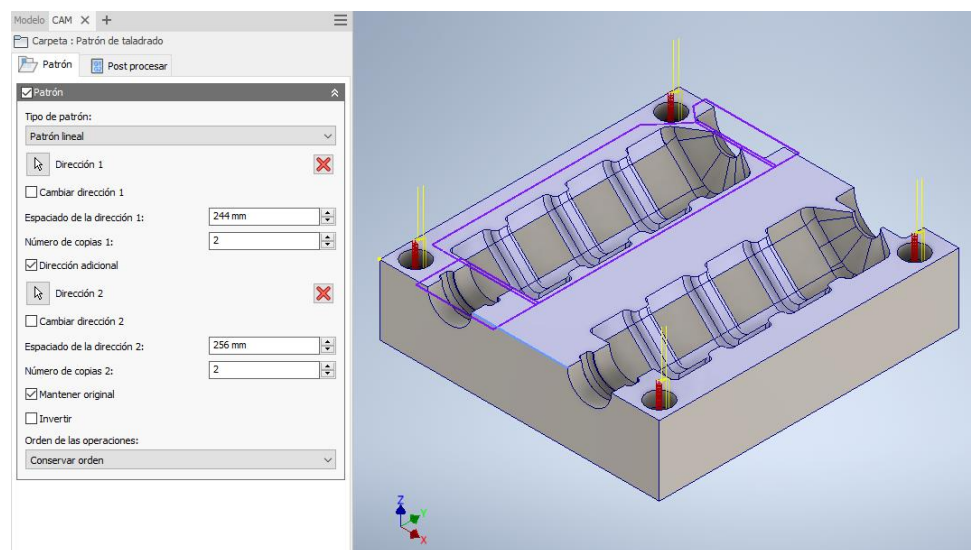


Figura 52: Configuración del patrón de taladrado y rutas resultantes

En la misma Figura 52 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento.

En la Figura 53 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 8:32 minutos en total para completarse.

En las zonas donde se aprecia color es debido a que la precisión de la visualización no permite un mejor ajuste, pero la ausencia de colisiones indica que el resultado de la operación es válido.



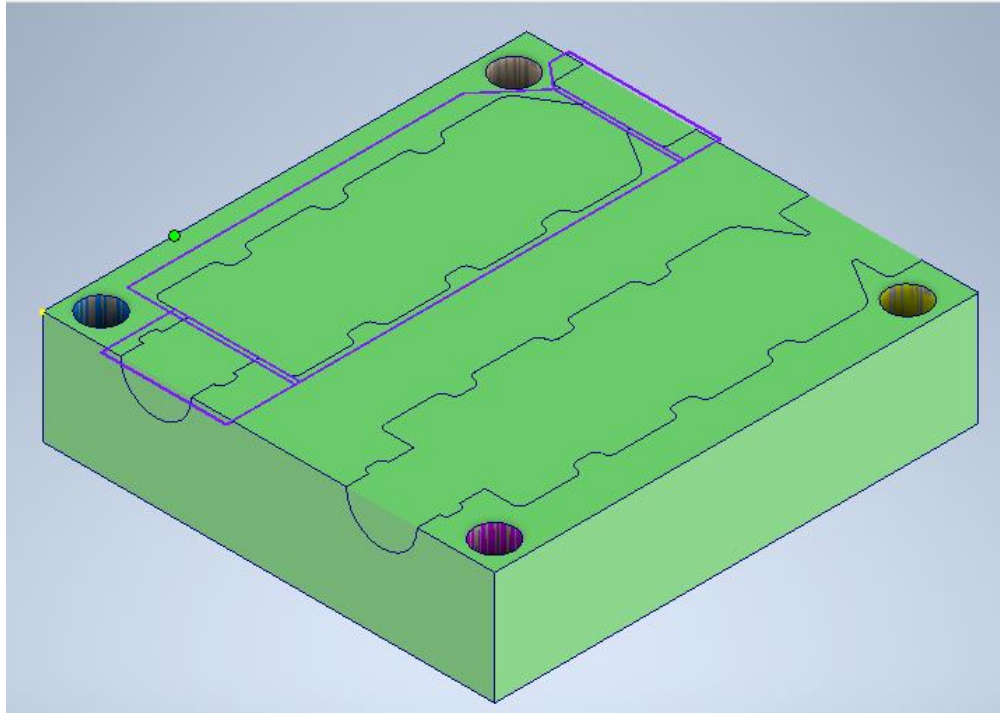


Figura 53: Estado del tocho tras la operación de taladrado

### 6.3.3. Desbaste pesado

La tercera operación que programaremos será un primer desbaste, que hemos llamado pesado, donde, con una herramienta de corte de diámetro grande con relación a las cavidades que se quieren remover, eliminaremos una gran cantidad de material, sin preocuparnos mucho de las zonas de más difícil acceso, que se mecanizarán en operaciones posteriores.

Para ello, seleccionaremos de nuevo la opción “Cajera” dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo la misma ventana que en el caso anterior.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas.

Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionados la fresa adecuada, en este caso la fresa plana de 20mm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 54.

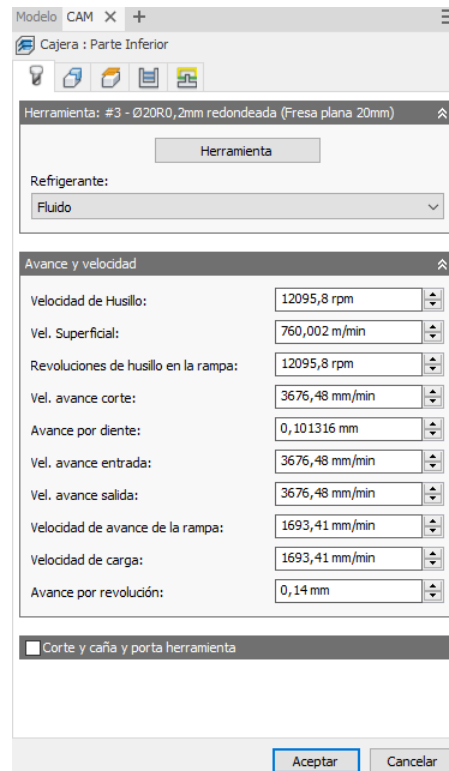


Figura 54: Pestaña "herramienta" en la operación de desbaste pesado

En la pestaña “geometría”, debemos elegir el modo “selección” dentro de las opciones “contorno de mecanizado” y seleccionar uno de los perímetros que hemos dibujado, en este caso el inferior.

También activaremos el menú “redesbaste”, para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se muestra en la Figura 55.

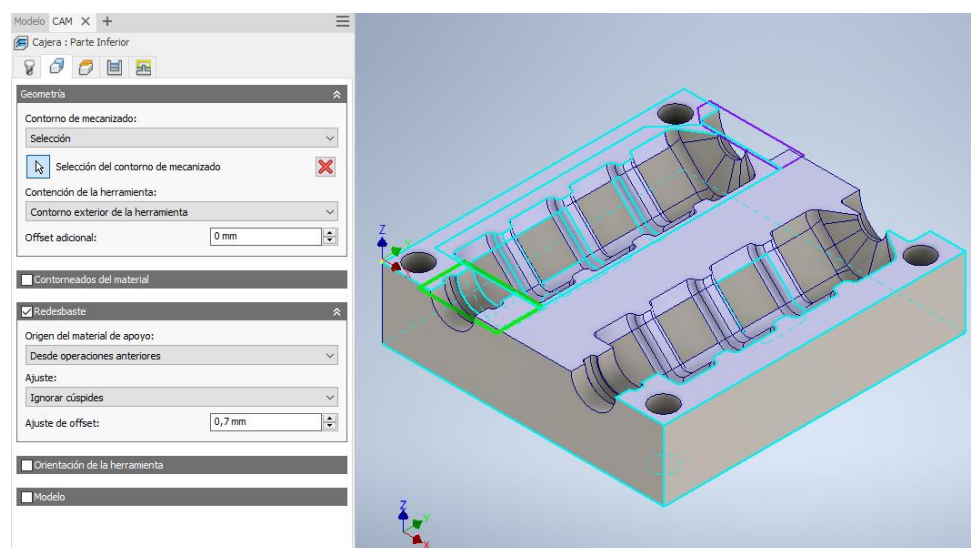


Figura 55: Pestaña "geometría" en la operación de desbaste pesado

El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los mismos parámetros que en la operación de taladrado, por lo que se va a evitar repetir las indicaciones ya dadas. En la Figura 49 se puede comprobar como quedarían distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

En la pestaña “pasadas” fijaremos el valor de “reducción de desbaste máxima” en 2mm, para que vaya cortando en pasadas de 2mm, ajustándose de este modo lo más posible al perfil de la geometría en cada plano de corte.

Activaremos la opción “detección de área plana” y el menú “sobrematerial”, ya que es una operación de desbaste, indicando 1mm, tanto radial, como axial.

Por último, activaremos el menú suavizado con el objetivo principal de aligerar el código resultante, lo que será de gran ayuda a la hora de generarlo.

En la Figura 56, se puede ver como quedaría configurada esta pestaña.

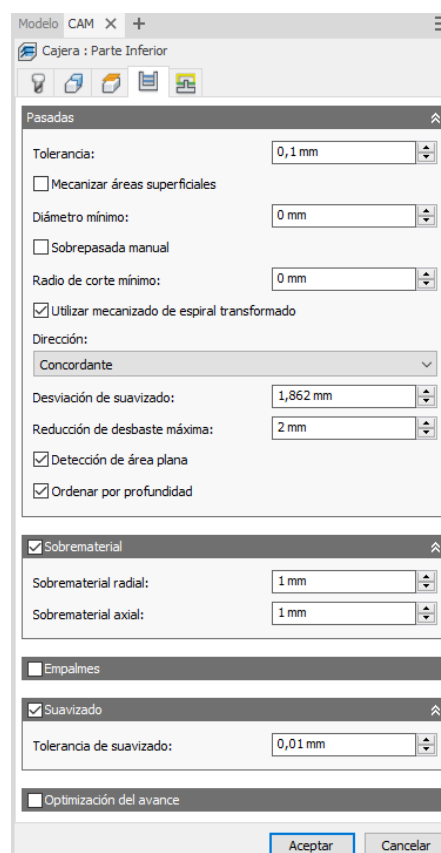


Figura 56: Pestaña "pasadas" en la operación de desbaste pesado

Finalmente, en la pestaña “Vinculación”, mantendremos los valores por defecto excepto el campo “rampa”, donde elegiremos “hélice” y ajustaremos el ángulo de descenso al máximo que permite la herramienta para reducir el tiempo de mecanizado, tal y como aparecen en la Figura 57.

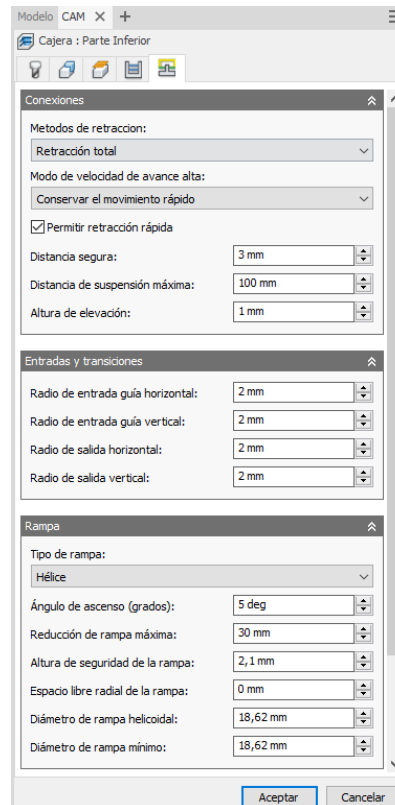


Figura 57: Pestaña "vinculación" en la operación de desbaste pesado

Ahora, aplicaremos este primer desbaste a las otras 2 zonas que hemos acotado. La única diferencia la encontraremos en la pestaña “geometría”, donde debemos seleccionar, cada vez, uno de los otros dos perímetros restantes, como se muestra en la Figura 58.

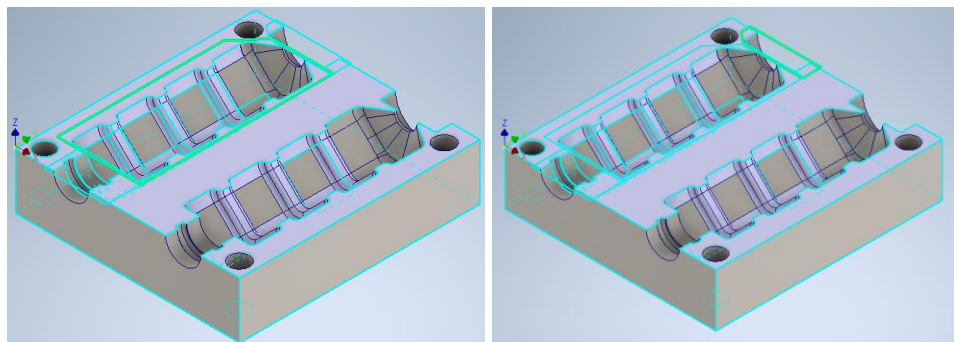


Figura 58: Geometrías para el desbaste pesado del resto del tocho

Sobre la carpeta que contiene estas 3 operaciones de desbaste pesado, también aplicaremos un patrón para realizar el mecanizado de las mismas cavidades del medio molde de la derecha, ya que ambos son idénticos. Se realiza del mismo modo descrito en la operación de taladrado.

En la Figura 59 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento, mientras que en la Figura 60 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 25:57 minutos en total para completarse.

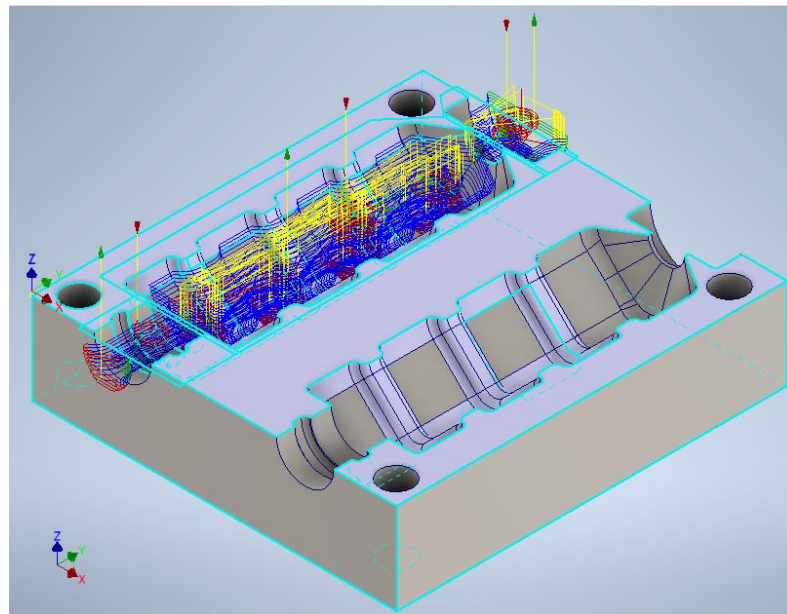


Figura 59: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de desbaste pesado (solo se muestra sobre uno de los moldes)

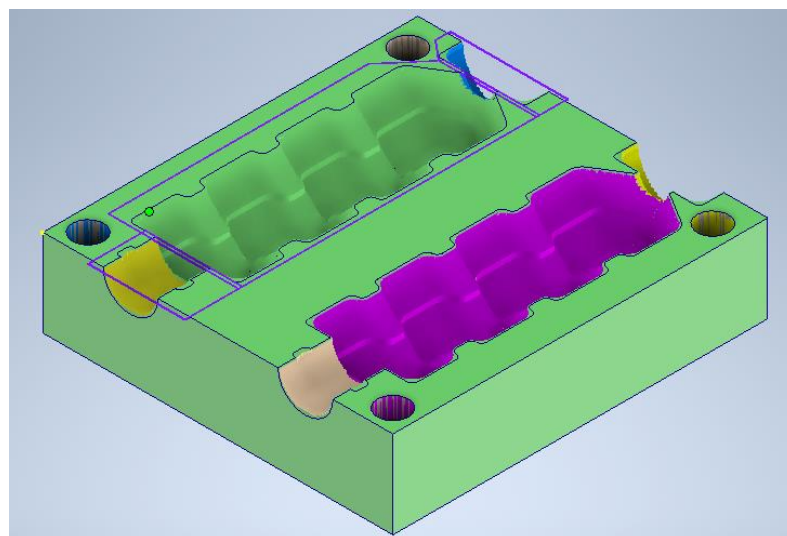


Figura 60: Estado del tocho tras la operación de desbaste pesado

#### 6.3.4. Desbaste fino

La cuarta operación que programaremos será un segundo desbaste, que hemos llamado fino, donde, con una herramienta de corte más pequeña, eliminaremos el material sobrante al que la herramienta grande no haya podido acceder, dejando una superficie mucho más limpia para las operaciones de acabado posteriores.

Para ello, seleccionaremos de nuevo la opción “Cajera” dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo la misma ventana que en el caso anterior.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas. Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionados la fresa adecuada, en este caso la fresa plana de 8mm de diámetro que ya utilizamos en la etapa de taladrado, tal y como se mostró en la Figura 47.

En la pestaña “geometría”, debemos elegir el modo “selección” dentro de las opciones “contorno de mecanizado” y seleccionar uno de los perímetros que hemos dibujado, en este caso el inferior.

También activaremos el menú “redesbaste”, para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se mostró en la Figura 55 en el desbaste pesado.

El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los mismos parámetros que en la operación anterior, por lo que se va a evitar repetir las indicaciones ya dadas.

En la Figura 49 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

En la pestaña “pasadas” fijaremos el valor de “reducción de desbaste máxima” en 1mm, para que vaya cortando en pasadas más pequeñas que en el desbaste pesado y así aumentar el ajuste a la geometría final.

Se muestra en la Figura 61 la configuración final y un detalle de este acabado de “escalones” en todo el contorno del molde, ya que es muy característico de este tipo de operaciones de desbaste con fresas planas.

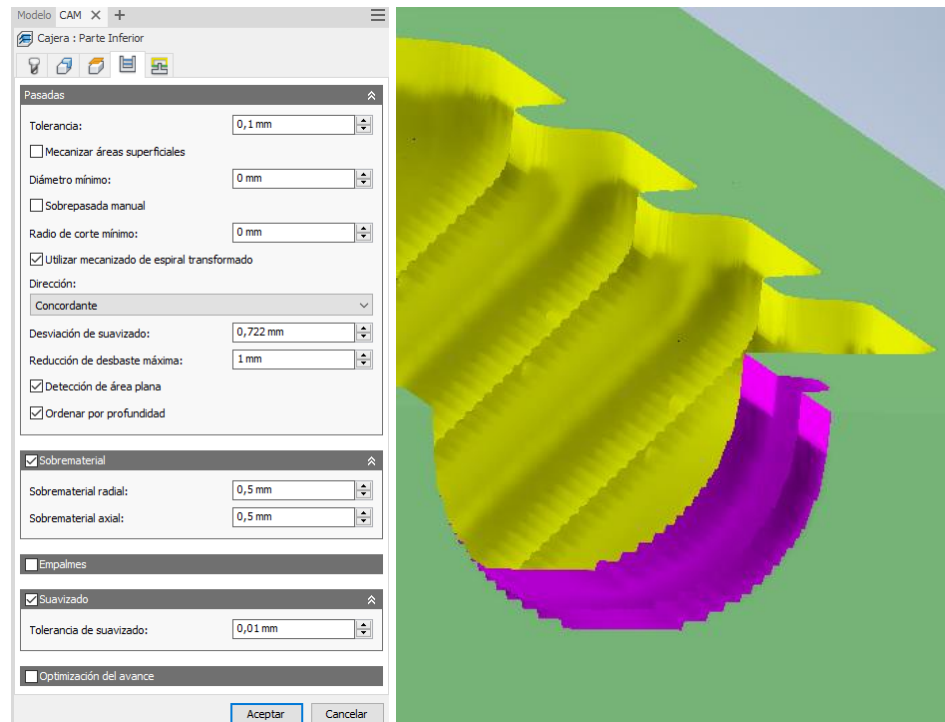


Figura 61: Pestaña "pasadas" en la operación de desbaste ligero y detalle de acabado "en escalones"

Además, activaremos también la opción "detección de área plana" y el menú "sobrematerial", pero esta vez indicando 0,5mm, tanto radiales, como axiales, para no dejar una cantidad de material excesivo a las operaciones de acabado posteriores, lo que conllevaría un aumento en el tiempo de mecanizado considerable.

Por último, activaremos el menú suavizado con el objetivo principal de aligerar el código resultante, lo que será de gran ayuda a la hora de generarlo.

Finalmente, en la pestaña "Vinculación", mantendremos los valores por defecto excepto el campo "rampa", donde elegiremos "hélice" y ajustaremos el ángulo de descenso al máximo que permite la herramienta para reducir el tiempo de mecanizado, tal y como apareció en la Figura 51, puesto que es la misma herramienta.

Al igual que hicimos en el desbaste pesado, aplicaremos este segundo desbaste a las otras 2 zonas que hemos acotado. La única diferencia la encontraremos en la pestaña "geometría", donde debemos seleccionar, cada vez, uno de los otros dos perímetros restantes, como se mostró anteriormente en la Figura 58.

Volveremos a aplicar un comando de patrón sobre la carpeta que contiene las operaciones de desbaste fino, exactamente del mismo modo que en el caso del desbaste pesado.

En la Figura 62 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento, mientras que en la Figura 63 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 15:21 minutos en total para completarse.

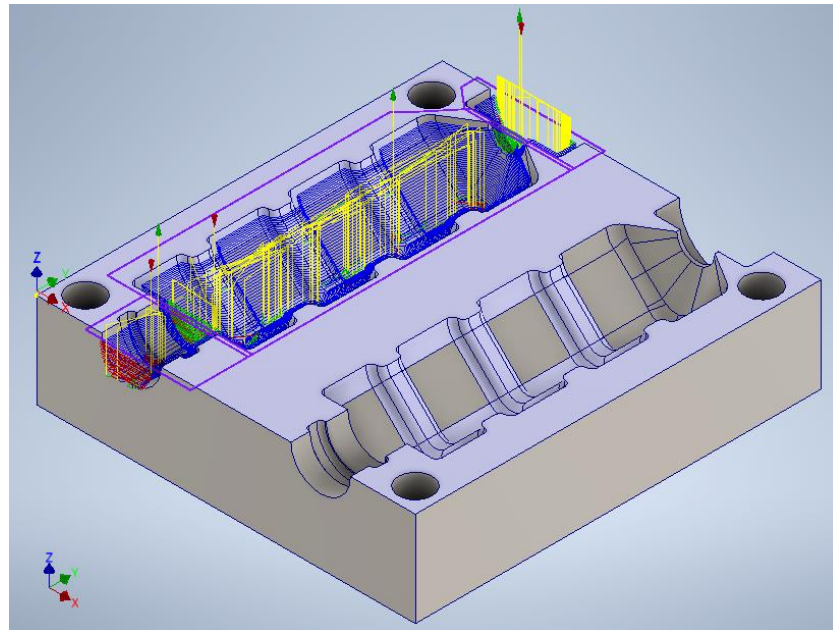


Figura 62: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de desbaste ligero (solo se muestra sobre uno de los moldes)

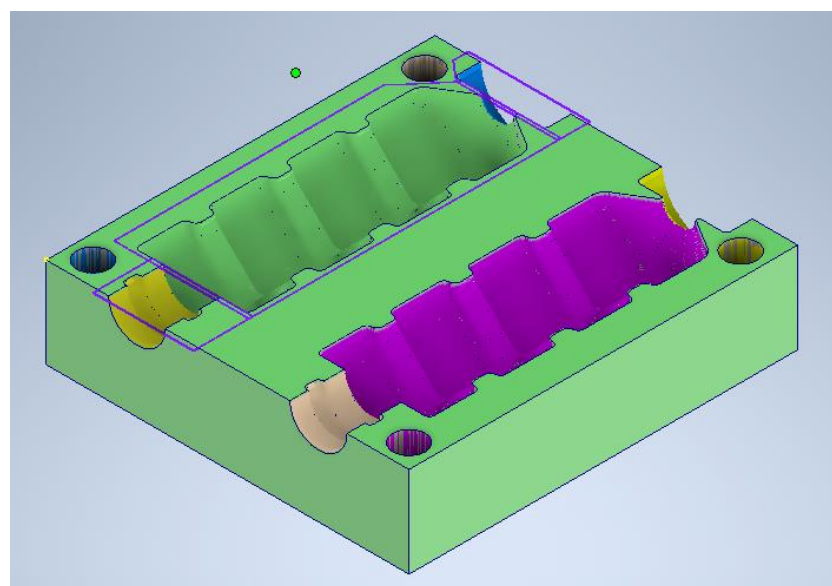


Figura 63: Estado del tocho tras la operación de desbaste ligero



### 6.3.5. Acabado de áreas con radio mínimo 4mm

La quinta operación que programaremos será la de acabado en las zonas donde el radio de redondeo mínimo sea de 4mm, donde utilizaremos una fresa de bola de diámetro 8mm.

Para ello, seleccionaremos de nuevo la opción “Cajera” dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo la misma ventana que en el caso anterior.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas. Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionamos la fresa adecuada, en este caso la fresa de bola de 8mm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 64.

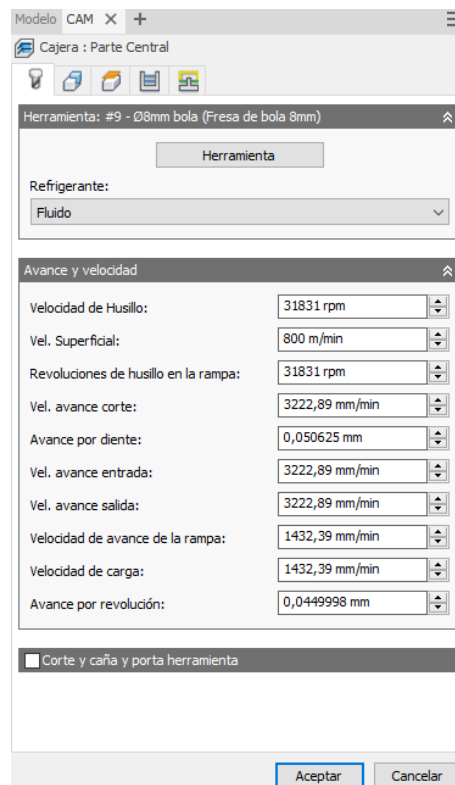


Figura 64: Pestaña "herramienta" en la operación de acabado 4mm

En la pestaña “geometría”, debemos elegir el modo “selección” dentro de las opciones “contorno de mecanizado” y seleccionar el perímetro central, que es el que contiene la geometría indicada. También activaremos el menú “redesbaste”, para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se muestra en la Figura 65.

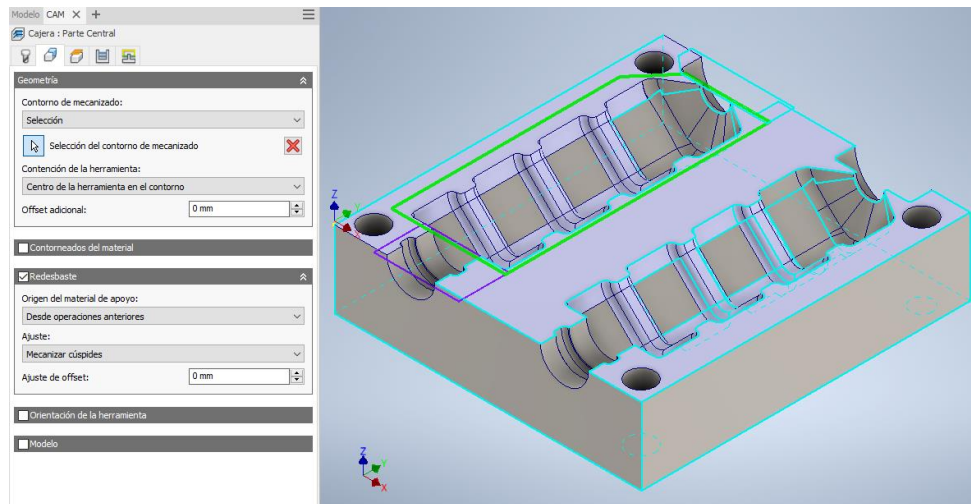


Figura 65: Pestaña "geometría" en la operación de acabado 4mm

El siguiente paso es configurar la pestaña "alturas". En ella estableceremos los mismos parámetros que en la operación de taladrado, por lo que se va a evitar repetir las indicaciones ya dadas. En la Figura 49 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

En la pestaña "pasadas" activaremos la opción "mecanizar áreas superficiales", lo que permitirá al programa multiplicar las pasadas en las zonas con una superficie más compleja para evitar la aparición de escalones en estas zonas y también la opción "sobrepasada manual" para evitar que estos niveles de corte adicionales sean demasiado finos, sobrecargando el programa CNC.

Además, fijamos la reducción de desbaste máxima y la sobrepasada máxima en 1mm, para obtener un acabado más fino.

Importante en esta operación desactivar el menú "sobrematerial", ya que es una pasada de acabado final.

Por último, activaremos el menú suavizado con el objetivo principal de aligerar el código resultante, lo que será de gran ayuda a la hora de generarlo.

En la Figura 66, se puede ver como quedaría configurada esta pestaña.

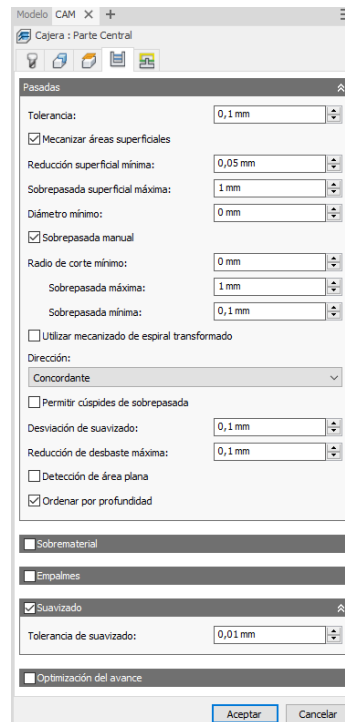


Figura 66: Pestaña "pasadas" en la operación de acabado 4mm

Finalmente, en la pestaña "Vinculación", mantendremos por completo los valores por defecto.

Volveremos a aplicar un comando de patrón sobre la carpeta que contiene esta operación, del mismo modo que en el caso del desbaste fino, para aplicar la operación al molde derecho.

En la Figura 67 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento.

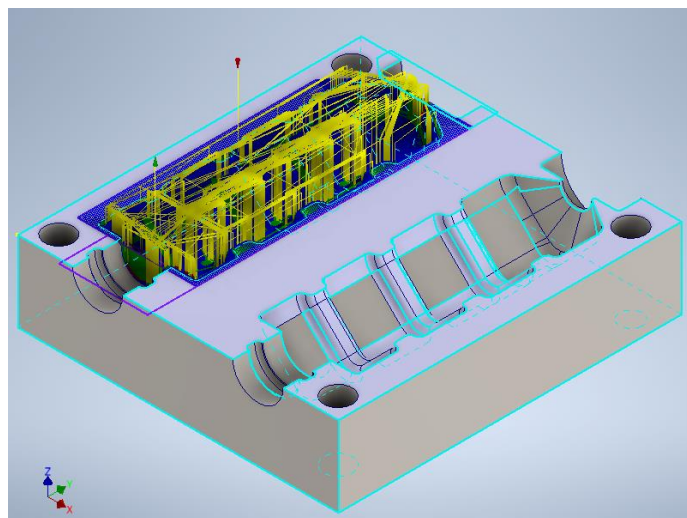


Figura 67: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de acabado 4mm (solo se muestra sobre uno de los moldes)

En la Figura 68 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 5:28:39 horas en total para completarse.

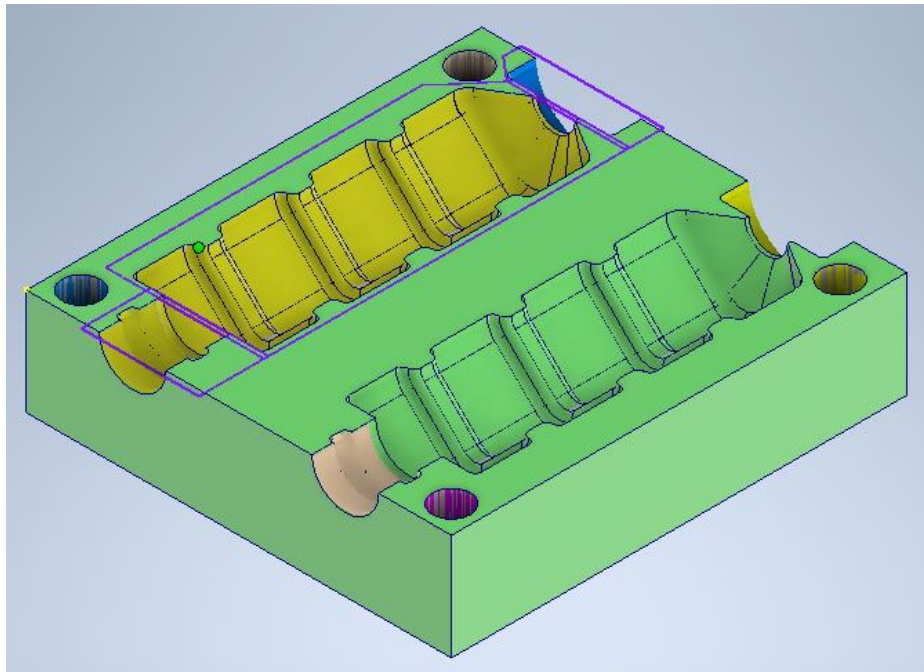


Figura 68: Estado del tocho tras la operación de acabado 4mm

### 6.3.6. Acabado de áreas con radio mínimo 3mm

La sexta operación que programaremos será la de acabado en las zonas donde el radio de redondeo mínimo sea de 3mm, donde utilizaremos una fresa de bola de diámetro 6mm.

Para ello, seleccionaremos de nuevo la opción “Cajera” dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo la misma ventana que en el caso anterior.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas.

Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionados la fresa adecuada, en este caso la fresa de bola de 6mm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 69.

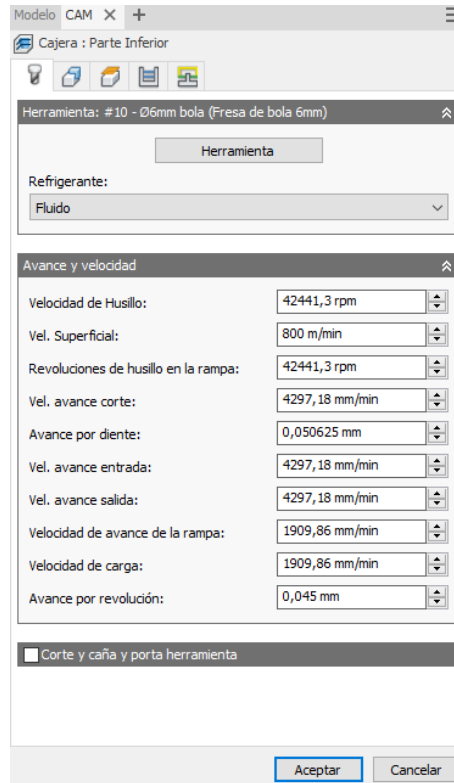


Figura 69: Pestaña "herramienta" en la operación de acabado 3mm

En la pestaña "geometría", debemos elegir el modo "selección" dentro de las opciones "contorno de mecanizado" y seleccionar uno de los perímetros que contienen geometría como la indicada, en este caso el inferior. También activaremos el menú "redesbaste", para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se muestra en la Figura 70.

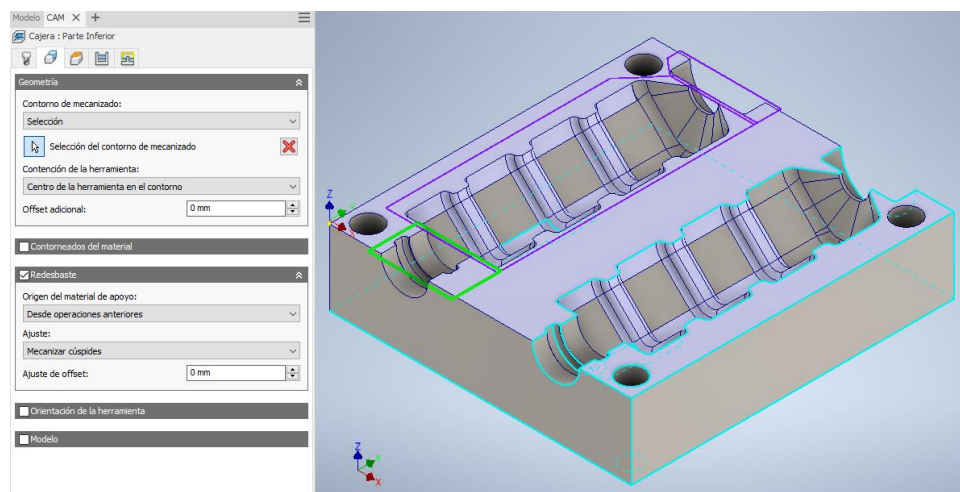


Figura 70: Pestaña "geometría" en la operación de acabado 3mm

El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los mismos parámetros que en la operación de taladrado, por lo que se va a evitar repetir las indicaciones ya dadas. En la Figura 49 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

En la pestaña “pasadas” utilizaremos exactamente la misma configuración que se explicó para la operación de acabado de 4mm, lo que se puede comprobar en la Figura 66.

Finalmente, en la pestaña “Vinculación”, mantendremos por completo los valores por defecto.

Al igual que hicimos en los desbastes, aplicaremos esta operación de acabado a la otra zona que resta, la superior.

La única diferencia la encontraremos en la pestaña “geometría”, donde debemos seleccionar este otro perímetro, como se muestra en la Figura 71.

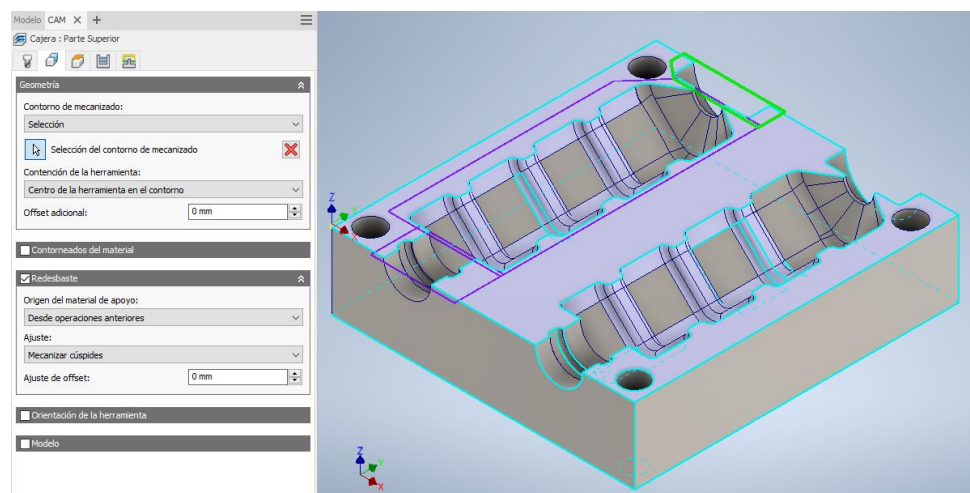


Figura 71: Geometrías para el acabado 3mm en el resto del tocho

Volveremos a aplicar, un comando de patrón sobre la carpeta que contiene las operaciones de acabado 3mm, exactamente del mismo modo que en el caso de los desbastes.

En la Figura 72 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento, mientras que en la Figura 73 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 1:21:48 horas en total para completarse.

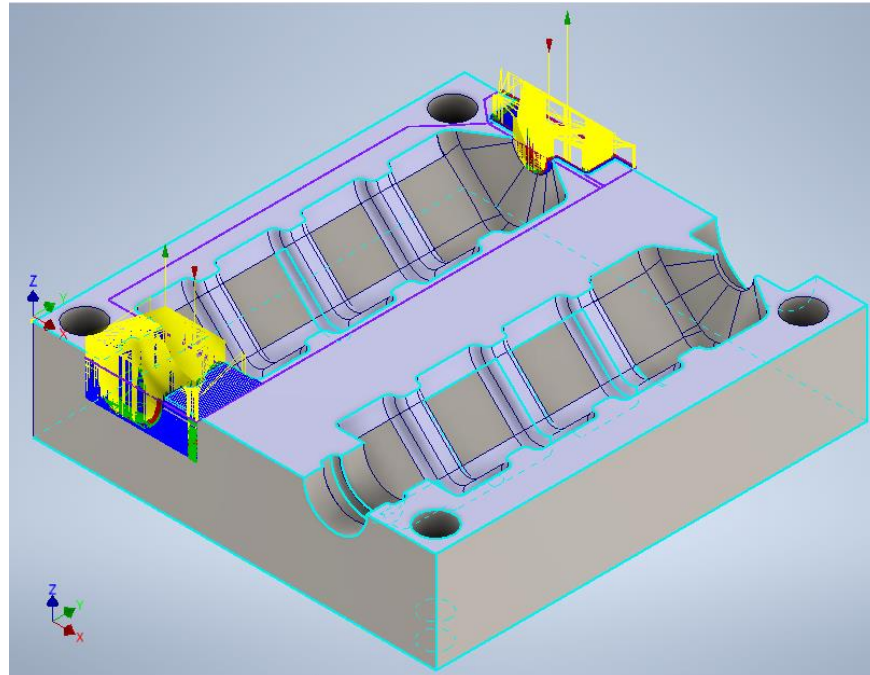


Figura 72: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de acabado 3mm (solo se muestra sobre uno de los moldes)

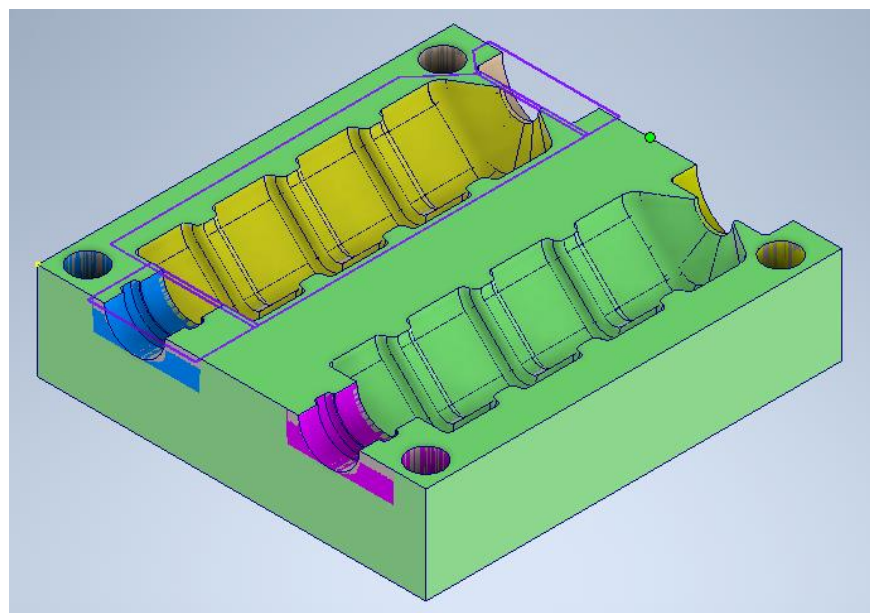


Figura 73: Estado del tocho tras la operación de acabado 3mm

Las áreas coloreadas sobre una de las caras laterales, se debe a una pasada que la herramienta realiza paralela a esa cara, pero sin llegar a retirar material. Por eso, el programa colorea esas zonas, pero no se le ha dado mayor importancia, puesto que no interfieren con la geometría a respetar.

### 6.3.7. Grabado de símbolos

La séptima y última operación que programaremos será la de grabado de los símbolos que identifican el material utilizado en las mismas, para ello, utilizaremos una fresa especial.

Por lo tanto, lo primero será generar la geometría que queremos grabar. En un boceto 2D en un plano paralelo a la cara superficial, importamos la imagen con las formas que se quieren incluir, y sobre ella se dibuja de forma manual la estructura alámbrica que debe seguir la punta de la herramienta. En la Figura 74 se pueden apreciar el boceto que se utilizará en esta operación.

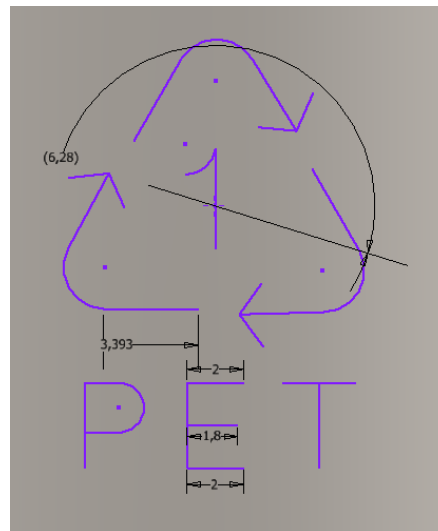


Figura 74: Boceto para la operación de grabado

La operación que utilizaremos en esta ocasión será la de “Grabado”, que se encuentra dentro del panel “Fresado 3D”, abriendo una ventana con las mismas pestañas que en los casos anteriores.

En la primera pestaña “herramienta”, debemos pinchar el botón que tiene el mismo nombre, conduciéndonos a la biblioteca de herramientas. Buscamos la biblioteca personalizada creada anteriormente y seleccionados la fresa adecuada, en este caso la fresa de bola de 1mm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 75. Nótese que las velocidades de avance de esta herramienta son muy bajas, de 50m/mm, debido a que su resistencia está limitada por el diámetro tan pequeño que posee, lo que impide que pueda soportar grandes cargas perpendiculares a su eje.





Figura 75: Pestaña "herramienta" en la operación de grabado

En la pestaña “geometría”, debemos elegir el modo “silueta” dentro de las opciones “contorno de mecanizado” y seleccionar todas las líneas que conforman el dibujo que queremos grabar en la pieza. También activaremos el menú “redesbaste”, para indicar que solo se calculen las rutas necesarias a partir del material restante procedente de las operaciones anteriores, tal y como se muestra en la Figura 76.

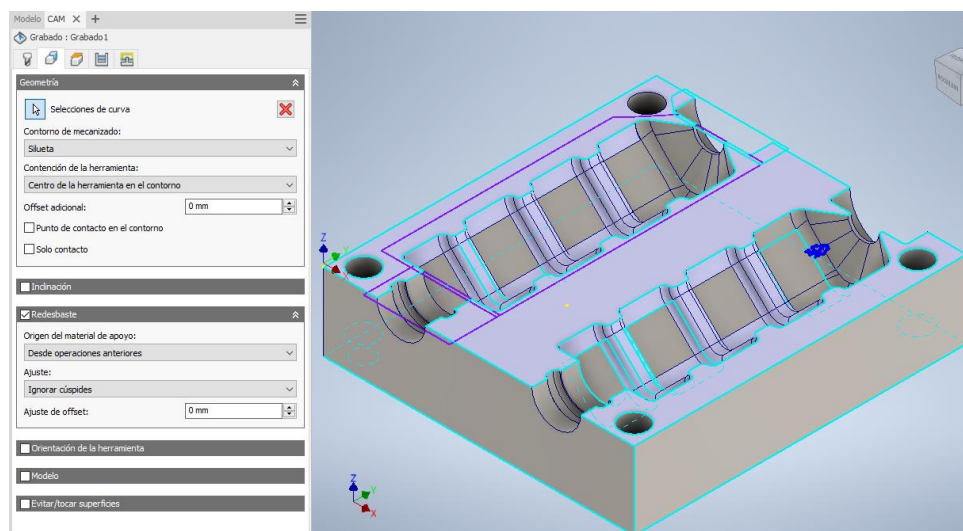


Figura 76: Pestaña "geometría" en la operación de grabado

El siguiente paso es configurar la pestaña “alturas”. En ella estableceremos los mismos parámetros que en la operación de taladrado, por lo que se va a evitar repetir las indicaciones ya dadas. En la Figura 49 se puede comprobar como quedan distribuidos los distintos planos de trabajo de la herramienta.

En la pestaña “pasadas” solo cambiaremos sobre lo que por defecto aparece la activación del menú “sobrematerial”, para indicar en este caso un sobrematerial axial de 1mm negativo, lo que se traduce en que la punta de la herramienta penetrará 1mm dentro del material se cual sea su altura en cada punto de la trayectoria.

Se ilustra en la Figura 77.

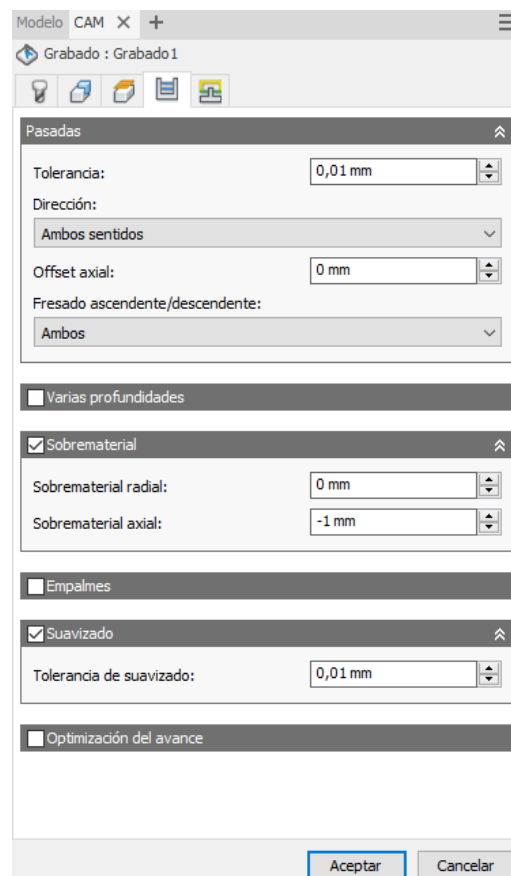


Figura 77: Pestaña "pasadas" en la operación de grabado

Finalmente, en la pestaña “Vinculación”, mantendremos por completo los valores por defecto.

Volveremos a aplicar un comando de patrón sobre la carpeta que contiene la operación de grabado, exactamente del mismo modo que en el caso de los desbastes.

En la Figura 78 se enseñan las rutas resultantes de este procedimiento, mientras que en la Figura 79 se muestra el estado de la pieza tras esta operación. Se han necesitado 7:47 minutos en total para completarse.

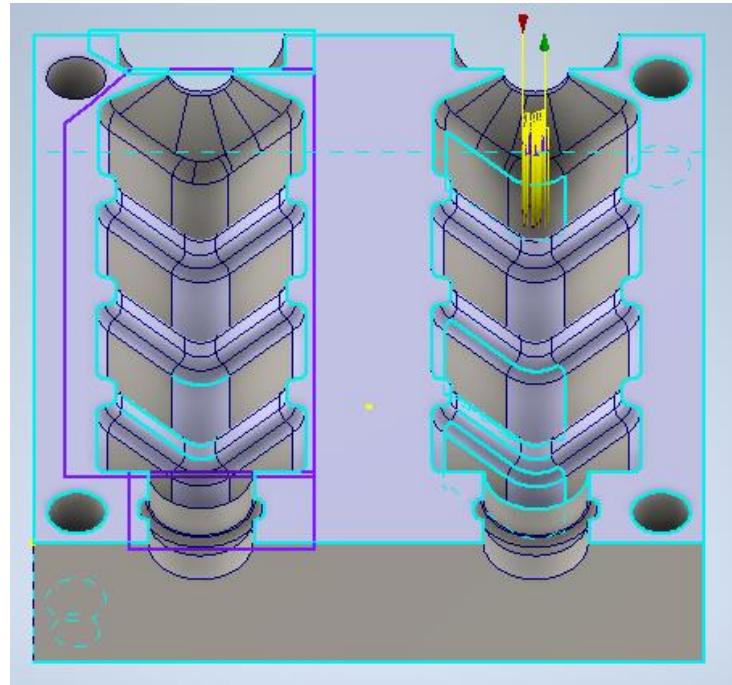


Figura 78: Rutas de la herramienta resultantes de la operación de grabado (solo se muestra sobre uno de los moldes)

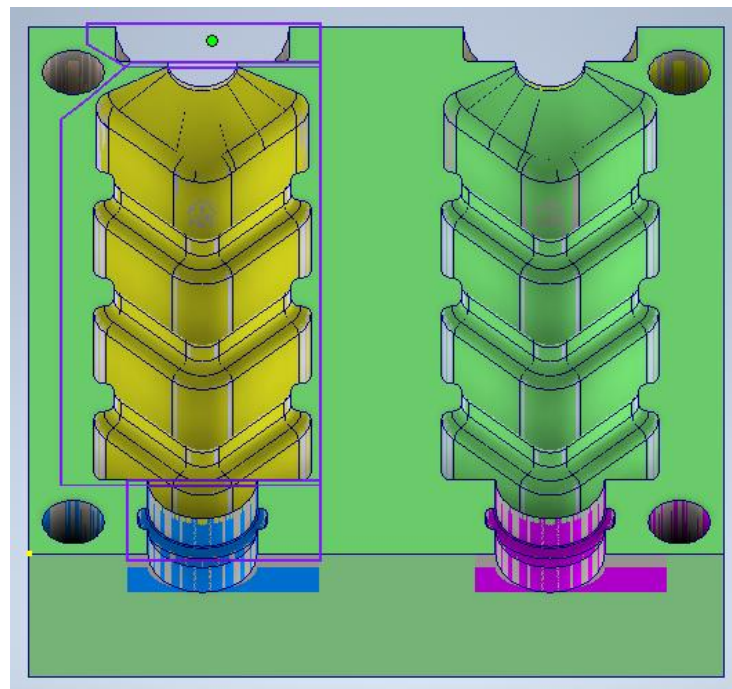


Figura 79: Estado del tocho tras la operación de grabado

## 6.4. Verificación del proceso y postprocesado

Una vez finalizado el mecanizado de la pieza, procederemos a verificar el resultado mediante la función de “Simular “ que ofrece Inventor CAM y, una vez dado el visto bueno, generar el código CNC que una máquina podría interpretar para generar en la realidad esta pieza.

### 6.4.1. Simulación de las operaciones

Simulando al completo la fase, podemos acceder a datos como el tiempo total de mecanizado, que coincide, como era de esperar con la suma de las operaciones individuales; 7 horas, 51 minutos 12 segundos para esta mitad del molde.

Para el molde completo, requeriríamos del doble de tiempo más el del cambio al segundo tocho y otras operaciones adicionales, lo que lo colocaría alrededor de las 16 horas.

En la Figura 80 se muestra la información más relevante que ofrecen las pestañas “información” y “estadísticas”

The image shows two screenshots of the Inventor CAM simulation interface. The left screenshot displays the 'Información' (Information) tab, and the right screenshot displays the 'Estadísticas' (Statistics) tab.

**Información Tab Data:**

| Posición              |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| Posición X:           | 73,649 mm                   |
| Posición Y:           | 228,87 mm                   |
| Posición Z:           | 60 mm                       |
| Velocidad de Husillo: | 15915,5 rpm Sentido horario |
| Velocidad de avance:  | Rápido                      |
| Movimiento:           | Rápido                      |

| Operación          |                                     |
|--------------------|-------------------------------------|
| Descripción:       | Grabado 1                           |
| Tipo:              | Grabado                             |
| Herramienta:       | #12 - Ø1mm bola (Fresa de minibola) |
| Offset de trabajo: | #0                                  |
| Configuración:     | Fase 1                              |
| Tiempo:            | 0:03:47 (0,8%)                      |

| Máquina      |        |
|--------------|--------|
| Descripción: | 3 ejes |
| Inclinación: | 0,000° |
| Giro:        | 0,000° |

| Verificación           |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Colisiones detectadas: | Ninguno                         |
| Volumen:               | 4,60105 dm <sup>3</sup> (75,0%) |
| Volumen inicial:       | 6,132 dm <sup>3</sup>           |
| Distancia:             | No disponible                   |

**Estadísticas Tab Data:**

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| Tiempo de mecanizado:    | 7:51:12    |
| Distancia de mecanizado: | 1,90205 km |
| Operaciones:             | 25         |
| Cambios de herramienta:  | 20         |

Figura 80: Pestañas "información" y "estadísticas" del módulo de simulación

En la Figura 81 se han realizado los ajustes necesarios en las opciones de visualización en la pestaña “mostrar” para hacer una comparación entre la pieza mecanizada y la referencia del modelo 3D que se quería reproducir.

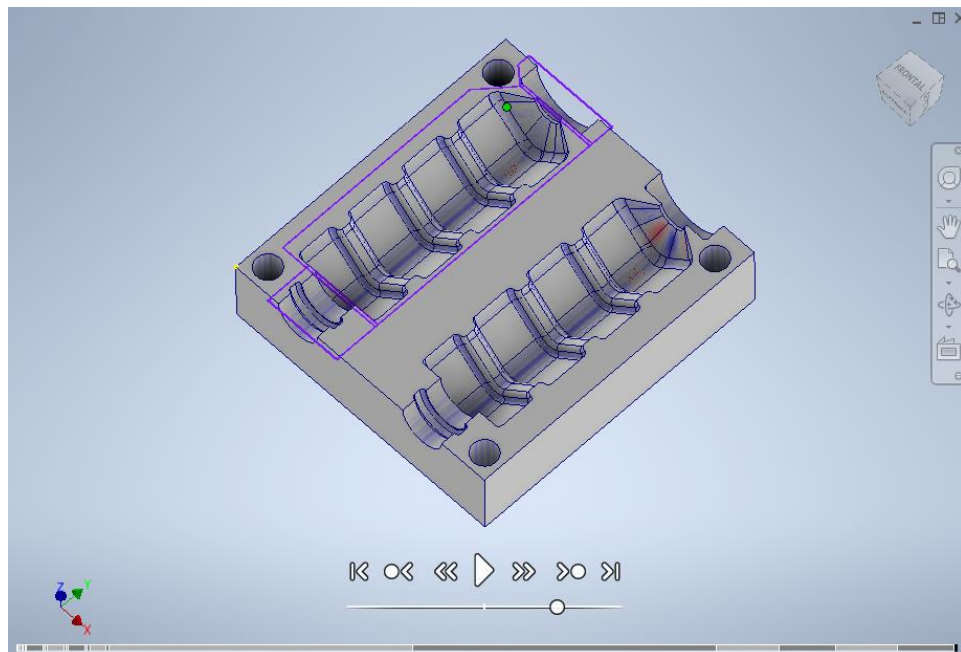


Figura 81: Comparación de piezas. Mecanizada vs referencia 3D

Los colores dan información acerca de la cantidad de material que ha quedado pendiente de retirar, en tonos azules, y las zonas en las que por el contrario se ha profundizado en exceso. En cualquier caso, las tolerancias generales alcanzadas son muy buenas y acordes a lo requerido para un molde de este tipo y aplicación.

También podemos observar en la barra inferior que no existe ninguna línea roja, que pondría de manifiesto alguna colisión durante el mecanizado con el material que no se debía mecanizar.

#### 6.4.2. Generación del código CNC

En este último paso, al que nos hemos referido en toda la extensión del trabajo como postprocesado, vamos a generar el código línea a línea que necesita una máquina de control numérico para reproducir as trayectorias que se han programado en Inventor CAM.

Para ello, pulsaremos sobre el botón “postprocesar”, en el módulo trayectorias, abriéndose la siguiente ventana, mostrada en la Figura 82.

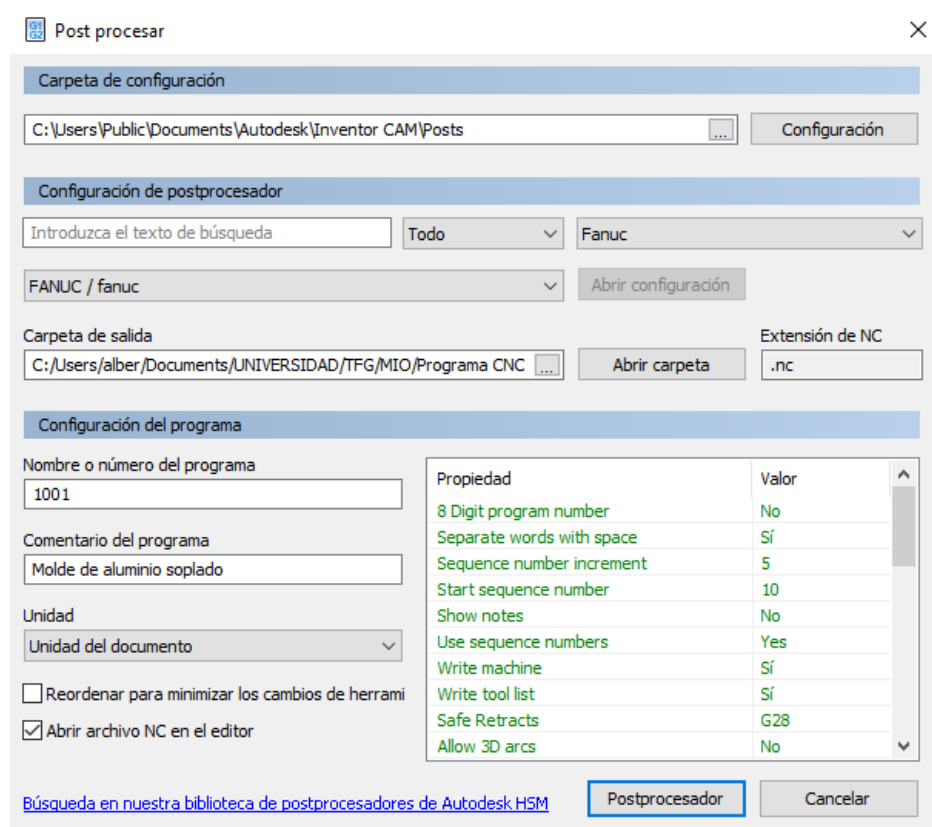


Figura 82: Ventana del módulo de postprocesamiento

En ella elegiremos un postprocesador de entre los disponibles, en nuestro caso vamos a optar por un FANUC / fanuc, puesto que es habitual encontrarlo en el entorno industrial de Valladolid. Este trabaja con un lenguaje muy extendido llamado G-code, muy conocido y aún más extendido si cabe, con la reciente aparición de las impresoras 3D en el mercado para particulares.

Tras seleccionar la carpeta de destino y escribir el nombre del programa, que suele ser un número, y si se precisa algún comentario sobre el programa, clicaremos en el botón de “postprocesador” de la parte inferior de la ventana.

Tras la generación del código, se abrirá en el editor de código integrado de Inventor. Para este trabajo de mecanizado, considerando solo la mitad del molde que se ha ido mostrando en el proceso, el código tiene cerca de 900.000 líneas, lo que ocuparía más de 31.000 páginas en el presente formato.



Debido a ello, solo se mostrará un ejemplo del aspecto que tiene en la Figura 83, mientras que su extensión completa puede encontrarse en los anejos a la memoria del trabajo fin de grado.

N65 G00 Z11.25  
N70 G18 G03 X348.736 Z-1.25 I-12.5 F29088.  
N75 G01 X280.  
N80 X0.  
N85 G17 G02 Y59.444 J30.331  
N90 G01 X280.  
N95 G03 Y120.106 J30.331  
N100 G01 X0.  
N105 G02 Y180.768 J30.331  
N110 G01 X280.  
N115 G03 Y241.43 J30.331  
N120 G01 X0.  
N125 G18 G03 X-12.5 Z11.25 K12.5  
N130 G00 X-81.236 Y-1.218  
N135 Z10.

*Figura 83: Ejemplo del código CNC resultante*

## 7. CREACIÓN DE UN PRESUPUESTO

En este último epígrafe del capítulo, procederemos a la creación de un presupuesto sencillo, con un enfoque académico, del coste que supondría únicamente la etapa de mecanizado de las dos mitades del molde. No se considerará el coste de los tochos de partida.

Dividiremos los cálculos de los costes por mano de obra, directos e indirectos.

### Mano de obra y hora de máquina

Distinguiremos entre dos partidas de mano de obra:

- Por un lado, el trabajo que desarrollaría un ingeniero de fabricación, que sería quien en una empresa de mecanizados generaría las estrategias de mecanizado, haciendo todas las operaciones auxiliares hasta obtener el código CNC final.

Se puede asumir que, para un profesional, todo este trabajo podría suponer unos 30 minutos (0,5 horas), y consideraremos un precio de 125€/h.

- Por otro lado, el trabajo del operario, un oficial de primera, que realizaría las operaciones de puesta en marcha de la máquina, calibraciones previas, colocación del tocho y sujeción del mismo a la bancada de la fresadora, colocación de las herramientas, etc.

El Trabajo para el operario se calcula en unas 2 horas, y consideraremos un precio de 75€/h.

Además, debemos contar con el coste del trabajo de mecanizado realizado por el centro de fresado utilizado, que se cifrará en 100€/h, para un trabajo de 7:51:12 para cada mitad de molde, lo que supone 15:42:24 estrictamente de tiempo de mecanizado, a lo que debemos sumarle tiempos de otras operaciones auxiliares, como los cambios de herramientas o la calibración inicial de la posición y las cotas reales del tocho, entre otras que pueden existir.

Podemos asumir que se trate de 16 horas en total.



### Costes directos. Amortizaciones.

Se considerará únicamente el coste de las herramientas, con los siguientes costes de adquisición (obtenidos del propio fabricante o un comercial del sector) y amortizaciones:

- Fresa de planear: 15,65€/ud, las 12 plaquitas necesarias ascienden a 187,8€, 5% de las plaquitas. Para el portaplaquitas es insignificante considerar una amortización.
- Fresa plana 20mm: 414,16€, 5%.
- Fresa plana 8mm: 74,22€, 10%.
- Fresa de bola 8mm: 99,46€, 40%.
- Fresa de bola 6mm: 59,38€, 20%.
- Fresa de bola 1mm: 35,63, 10%

El coste amortizado de elementos como el ordenador que se utilice para la programación del mecanizado, la licencia de Inventor CAM, el sistema operativo, la máquina de fresado, etc... Son completamente despreciables, puesto que, aunque el coste de adquisición de alguno de ellos puede ser muy elevado, la amortización anual acaba siendo baja.

Además, habría que repartirla entre todos los trabajos realizados durante un año, razón por la que se incluirán en el beneficio industrial incluido en el presupuesto.

### Costes indirectos

Se considerarán ciertos costes indirectos, que son aquellos que son consecuencia de la actividad, pero no se puede atribuir directamente.

- Costes de gestión y administrativos: 150€
- Costes logísticos: 50€

### Costes totales

Aplicaremos un beneficio industrial del 25% adicional de la suma resultante de los conceptos anteriores presupuestados para la actividad, pro o que, finalmente la cotización completa de este trabajo sería la que se puede ver en la Figura 84.

| COSTE POR HORA DE RECURSO |               |                |            |
|---------------------------|---------------|----------------|------------|
| Concepto                  | Precio / hora | Cantidad horas | Subtotal   |
| Ingeniero                 | 125,00 €      | 0,5            | 62,50 €    |
| Operario                  | 75,00 €       | 2              | 150,00 €   |
| Máquina                   | 100,00 €      | 16             | 1.600,00 € |
|                           |               |                |            |
| COSTES DIRECTOS           |               |                |            |
| Concepto                  | Precio        | Amortización   | Subtotal   |
| Plaquetas planear         | 187,80 €      | 5%             | 9,39 €     |
| Fresa plana 20mm          | 414,16 €      | 5%             | 20,71 €    |
| Fresa plana 8mm           | 74,22 €       | 10%            | 7,42 €     |
| Fresa bola 8mm            | 99,46 €       | 40%            | 39,78 €    |
| Fresa bola 6mm            | 59,38 €       | 20%            | 11,88 €    |
| Fresa bola 1mm            | 35,63 €       | 10%            | 3,56 €     |
|                           |               |                |            |
| COSTES INDIRECTOS         |               |                |            |
| Concepto                  | Precio        | Cantidad       | Subtotal   |
| Gestión y administración  | 150,00 €      | 1              | 150,00 €   |
| Logística                 | 50,00 €       | 1              | 50,00 €    |
|                           |               |                |            |
| BENEFICIO INDUSTRIAL      |               |                |            |
| 25%                       |               |                | Subtotal   |
|                           |               |                | 488,81 €   |
|                           |               |                |            |
| TOTAL                     |               |                | 2.444,05 € |

Figura 84: Presupuesto final. Tabla resumen



## 8. CONCLUSIONES

Como último capítulo de este trabajo fin de grado, de expondrán las conclusiones extraídas del mismo, separándolas en dos niveles. Por un lado, las conclusiones académicas, que tienen más que ver con aspectos técnicos y de la resolución del problema planteado, y las de tipo personal por otro, más enfocadas en opiniones personales y en el aprendizaje extraído durante el desarrollo del trabajo.

### 8.1. Conclusiones académicas

En primer lugar, se expusieron brevemente los antecedentes más importantes con respecto a la aparición de la tecnología CAM que nació íntimamente ligada al CAD, pasando a exponer en el siguiente capítulo de forma ligera el proceso de moldeo y posteriormente de con mayor profundidad, el moldeo por soplado de preformas.

En el siguiente capítulo, se expuso de manera genérica un proceso de programación de fabricación por mecanizado utilizando el módulo CAM del software Inventor, propiedad de Autodesk Inc. En él se dieron las pautas para que alguien que no conozca este programa, pueda iniciarse en él de una manera mucho más fluida y dinámica.

Finalmente, en el capítulo principal de este trabajo se han expuesto todas las condiciones de contorno del problema planteado, así como a metodología de resolución empleada. En este apartado se quiere dar justificación al por qué de utilizar geometría de soporte y operaciones más sencillas y “manuales”, como es la cajera 3D, en vez de opciones mucho más automáticas, polivalentes e “inteligentes”, como podría ser un desbaste adaptativo 3D.

Principalmente tiene que ver con la reducción del tiempo de mecanizado y la distancia de mecanizado totales, puesto que aunque esta estrategia más automática genera todas las trayectorias necesarias para llegar a resultados muy similares con solo 2 o 3 operaciones, el tiempo de mecanizado resultante se extiende hasta el doble de horas aproximadamente y, por lo tanto, los metros que las herramientas recorren retirando material aumentan en la misma medida, lo que redundará en un aumento del desgaste para la fabricación de un solo molde.

Por otro lado, tampoco es despreciable la diferencia en el esfuerzo de computación que se requiere en cada caso, especialmente para un ordenador doméstico como el utilizado.

Para poder comparar, pongamos números sobre la mesa: con la estrategia de cajas se tuvieron que invertir alrededor de 2 horas de preparación hasta que se encontró la división óptima de las parcelas de trabajo, pero después el tiempo de cálculo para la fase completa tomaba sobre los 30 minutos para las trayectorias y la tercera parte para la simulación. La forma de proceder con desbastes adaptativos nada refinados necesitaba alrededor de 5 veces más para realizar los cálculos. Esta diferencia notable permitió hacer muchas más iteraciones en el caso de la metodología por cajas, buscando la configuración óptima en cada operación.

Como última parte afectada por esta optimización en el proceso, se encuentra el postprocesado, cuya extensión en líneas de código es directamente proporcional al tiempo de mecanizado total, por lo que, si estábamos hablando de alrededor del doble de tiempo, estamos hablando del doble de líneas de código, pasando de casi de 900.000 a 1,8 millones aproximadamente, lo que se puede presuponer será un programa muy pesado.

De este ejercicio, se detectado la necesidad de incluir la intervención de un ingeniero de fabricación en el presupuesto, pero se ha inferido que una persona acostumbrada profesionalmente a hacer este tipo de trabajos podría requerir tan solo de 30 minutos para lograr lo mismo que se ha hecho en este trabajo, fruto de la experiencia.

Como líneas de trabajo futuras, podría explorarse la vía de intentar desarrollar una máquina sencilla de manera completa, desde el diseño CAD de las piezas y chapas cortadas y plegadas necesarias, hasta su ensamblaje, la fabricación mediante CAM de todas ellas utilizando las operaciones de mecanizado que se precisen (fresados en 5 ejes, torneado, corte laser, etc).

Siguiendo el proceso productivo, se podría ir mucho más allá, haciendo uso de otros módulos de los que dispone el programa, como el análisis de tensiones estáticas y dinámicas ante cargas permanentes o dinámicas, el análisis de fluidos o la disipación térmica de elementos como la electrónica, ya que Inventor cuenta con el soporte de Fusion 360 integrado en su interface.



## 8.2. Conclusiones personales

En el aspecto personal, este trabajo me ha aportado la capacidad de trabajar con manuales y catálogos de herramientas de fabricación de no pocas páginas así como ampliar los conocimientos adquiridos en el las asignaturas de Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación que figuran en el plan de estudios del Grado de Ingeniería Mecánica de la Escuela de ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, como son los detalles más profundos del proceso de moldeo por soplado de preformas, y las tecnologías CAD y especialmente la CAM, menos conocida fuera de la industria que la CAD.

También he podido practicar la resolución de un problema de manera formal, estructuradamente y con orden en la exposición de ideas, algo muy importante en la vida profesional de un ingeniero.

Por último, puedo decir que me he iniciado en el manejo de programa Inventor CAM, lo cual es una habilidad interesante si se quiere adquirir a este sector de la industria.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## 9. BIBLIOGRAFÍA

### 9.1. Libros, artículos y trabajos

ASCENT. (2021). *Autodesk Inventor CA 2022 – milling fundamentals*.  
Charlottesville: ASCENT - Center for technical knowledge.

NAGESWARA RAO, P. (2010). *CAD/CAM Principles and applications*. New  
Delhi: McGraw Hill Education.

MATOS GONZÁLEZ, F. (2022). *Mecanizado de un molde de acero para  
fundición en coquilla mediante Autodesk Inventor CAM*. Trabajo Fin de  
Grado. Valladolid: Universidad de Valladolid

BAEZA GARCÍA, R. (2015). *Diseño y fabricación de un molde de inyección  
para envases de uso alimentario*. Trabajo Fin de Grado. Valencia:  
Universidad Politécnica de Valencia.

### 9.2. Bibliografía web

FORMACAD. *La historia del CAM (Mecanizado)*

< <https://formacad.es/la-historia-del-cam-mecanizado/> > [Consulta:  
19 de diciembre de 2023]

*Ventajas y desventajas de CAD/CAM.*

< <https://www.proscont.com/ventajas-y-desventajas-cad-cam/> >  
[Consulta: 23 de diciembre de 2023]

FORMLABS. *Cómo hacer un molde: Guía de fabricación de moldes para  
profesionales.*

< <https://formlabs.com/es/blog/como-hacer-un-molde/> > [Consulta:  
28 de diciembre de 2023]

*Conoce los tipos de moldes industriales.*

< [https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/conoce-los-tipos-  
moldes-industriales/](https://www.fabricantes-maquinaria-industrial.es/conoce-los-tipos-moldes-industriales/) > [Consulta: 3 de enero de 2024]



DASSAULT SYSTEMES. *Moldeo por inyección.*

< <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/injection-molding> >  
[Consulta: 8 de enero de 2024]

*Tecnologías de los Plásticos. Inyección-soplado.*

< <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/03/inyeccion-soplado.html> > [Consulta: 12 de enero de 2024]

ATALAS COPCO. *La importancia de dimensionar de manera correcta el compresor de aire de PET.*

< <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog/correct-pet-air-compressor-sizing> > [Consulta: 16 de enero de 2024]

POLY LANEMA. *Aleaciones especiales para la fabricación de moldes.*

< <https://www.polylanema.pt/es/aluminio-para-moldes/> > [Consulta: 20 de enero de 2024]

CAETANO, M. *Materiales utilizados en la construcción de moldes.*

< <https://www.ctborracha.com/materiales-utilizados-en-la-construccion-de-moldes/> > [Consulta: 23 de enero de 2024]

*Propiedades mecánicas de los aluminios.*

< <https://fabricatium.com/aluminios-para-mecanizado-cnc/> >  
[Consulta: 27 de enero de 2024]

GABRIAN INTERNATIONAL. *Aluminio 6061: Conozca sus propiedades y usos.*

< <https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/> > [Consulta: 2 de febrero de 2024]

BASS TOOL & SUPPLY, INC. *Catalog*

< <https://bass-tool-and-supply-inc.dcatalog.com/v/Bass-Tool-Catalog-2021/> > [Consulta: 7 de febrero de 2024]



## ANEXO I. DATOS DE LAS HERRAMIENTAS

### Fresa planeadora

- Portaherramientas

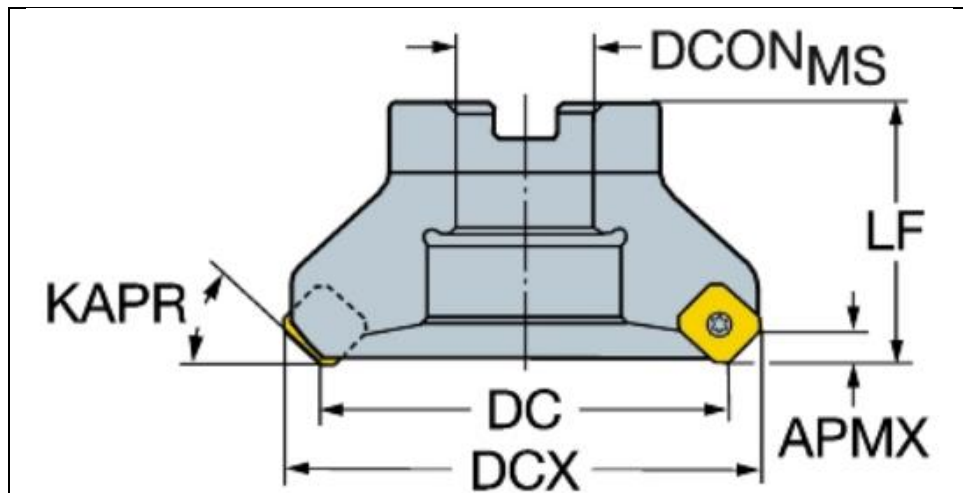
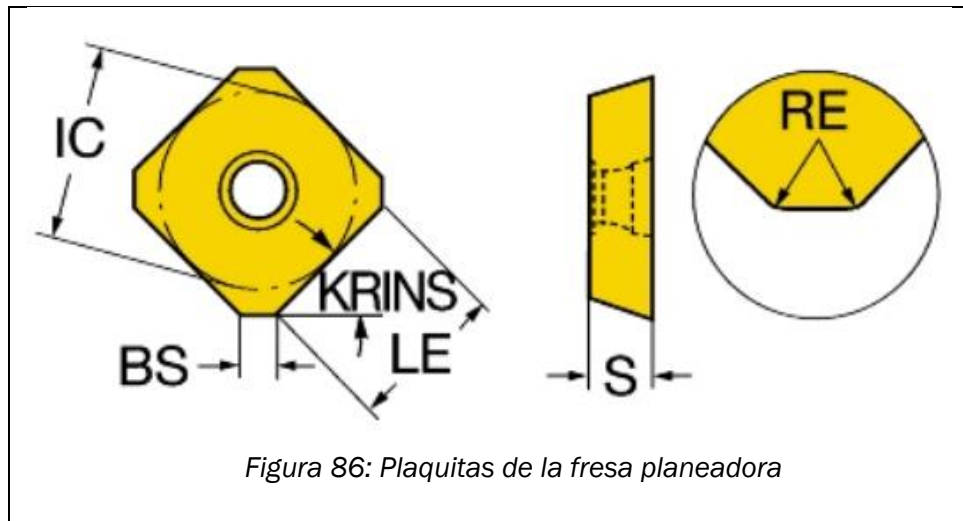


Figura 85: Portaherramientas de la fresa planeadora

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| Fabricante                         | Sandvik         |
| Código ISO                         | R245-125Q40-12H |
| Ángulo de filo (KAPR)              | 45°             |
| Diámetro de corte (DC)             | 125 mm          |
| Diámetro máximo de corte (DCX)     | 137.5 mm        |
| Número de elementos de corte       | 12              |
| Profundidad de corte máxima (APMX) | 6 mm            |
| Diámetro de conexión (DCONMS)      | 40 mm           |
| Longitud funcional (LF)            | 63 mm           |
| Velocidad de giro máxima           | 10100 rpm       |
| Peso del elemento                  | 2.8 kg          |

- Plaquita



|                                    |                     |
|------------------------------------|---------------------|
| Fabricante                         | Sandvik             |
| Código ISO                         | R245-12 T3 E-AL H10 |
| Clasificación de material, nivel 1 | K, N                |
| Diámetro del agujero de fijación   | 4.1 mm              |
| Número de filos                    | 4                   |
| Diámetro del círculo inscrito (IC) | 13.4 mm             |
| Longitud efectiva del filo (LE)    | 10 mm               |
| Longitud filo Wiper (BS)           | 2.3 mm              |
| Ángulo de filo principal (KRINS)   | 45°                 |
| Ángulo de desprendimiento          | 15°                 |
| Grosor de plaquita (S)             | 3.96875 mm          |
| Radio de punta (RE)                |                     |
| Peso de la plaquita                | 0.0056kg            |
| Velocidad de corte Vc (desbaste)   | 845 m/mm            |
| Velocidad de corte Vc (acabado)    | 924 m/mm            |
| Avance por diente fz (desbaste)    | 0.24 mm/rev         |
| Avance por diente fz (acabado)     | 0.153 mm/rev        |

### Fresa plana de 20mm

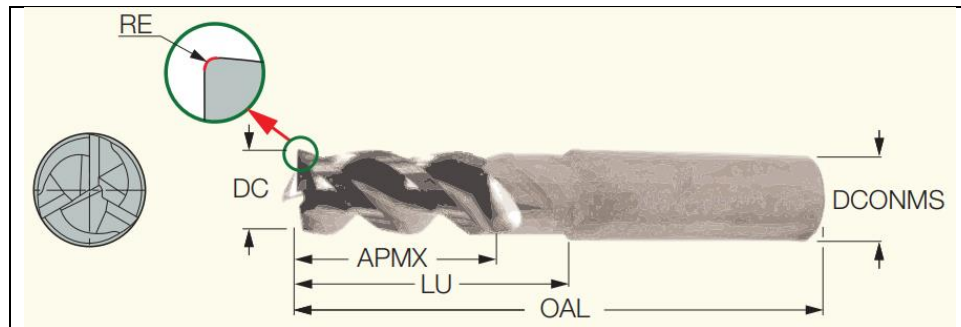


Figura 87: Fresa plana de 20mm

|                                    |                           |
|------------------------------------|---------------------------|
| Fabricante                         | ISCAR                     |
| Designación                        | ECA-H3 20-30/100C20CF-R02 |
| Diámetro de corte (DC)             | 20 mm                     |
| Número de elementos de filos       | 3                         |
| Profundidad de corte máxima (APMX) | 30 mm                     |
| Diámetro de conexión (DCONMS)      | 20 mm                     |
| Longitud del saliente (LU)         | 100 mm                    |
| Longitud total (OAL)               | 150 mm                    |
| Ángulo de rampa máximo             | 5°                        |
| Radio de punta (RE)                | 0.2 mm                    |
| Velocidad de corte Vc (desbaste)   | 700 - 760 m/mm            |
| Avance por diente fz               | 0.05 - 0.14 mm/rev        |

## Fresa plana de 8mm

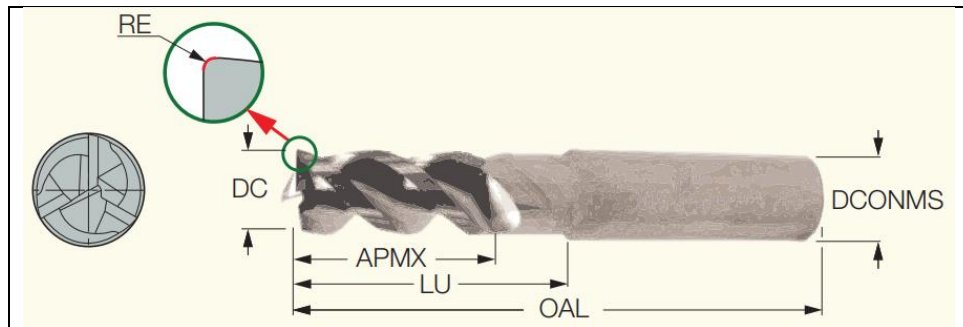


Figura 88: Fresa plana de 8mm

|                                    |                          |
|------------------------------------|--------------------------|
| Fabricante                         | ISCAR                    |
| Designación                        | ECA-H3 08-12/40C08CF-R02 |
| Diámetro de corte (DC)             | 8 mm                     |
| Número de elementos de filos       | 3                        |
| Profundidad de corte máxima (APMX) | 12 mm                    |
| Diámetro de conexión (DCONMS)      | 8 mm                     |
| Longitud del saliente (LU)         | 40 mm                    |
| Longitud total (OAL)               | 79 mm                    |
| Ángulo de rampa máximo             | 5°                       |
| Radio de punta (RE)                | 0.2 mm                   |
| Velocidad de corte Vc (desbaste)   | 700 - 760 m/mm           |
| Velocidad de corte Vc (acabado)    | 840 - 900 m/mm           |
| Avance por diente fz               | 0.03 - 0.09 mm/rev       |

## Fresa de bola de 8mm

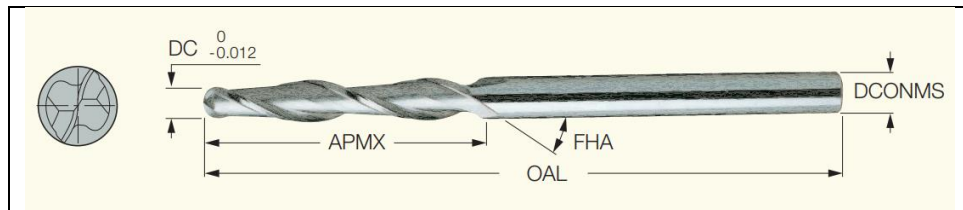


Figura 89: Fresa de bola de 8mm

|   |                     |
|---|---------------------|
| Fabricante                              | ISCAR               |
| Designación                             | EB-A2 08-50C08E150  |
| Diámetro de corte nominal (DC)          | 8 mm                |
| Número de elementos de filos            | 2                   |
| Profundidad de corte máxima (APMX)      | 50 mm               |
| Diámetro de conexión (DCONMS)           | 8 mm                |
| Longitud total (OAL)                    | 150 mm              |
| Ángulo de desahogo de viruta (FHA)      | 30°                 |
| Tolerancia del radio de esquina (RETOL) | +/- 0.02 mm         |
| Velocidad de corte Vc (acabado)         | 700 - 800 m/mm      |
| Avance por diente fz                    | 0.045 - 0.07 mm/rev |

### Fresa de bola de 6mm

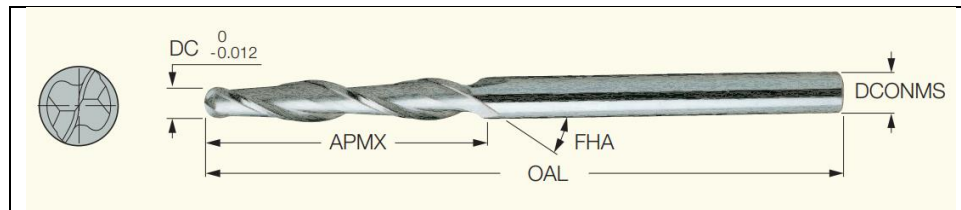


Figura 90: Fresa de bola de 6mm

|   |                     |
|---|---------------------|
| Fabricante                              | ISCAR               |
| Designación                             | EB-A2 06-50C06E150  |
| Diámetro de corte nominal (DC)          | 6 mm                |
| Número de elementos de filos            | 2                   |
| Profundidad de corte máxima (APMX)      | 50 mm               |
| Diámetro de conexión (DCONMS)           | 8 mm                |
| Longitud total (OAL)                    | 150 mm              |
| Ángulo de desahogo de viruta (FHA)      | 30°                 |
| Tolerancia del radio de esquina (RETOL) | +/- 0.02 mm         |
| Velocidad de corte Vc (acabado)         | 700 - 800 m/mm      |
| Avance por diente fz                    | 0.045 - 0.07 mm/rev |

### Fresa de bola de 1mm



Figura 91: Fresa de bola de 1mm

|   |                    |
|---|--------------------|
| Fabricante  | ISCAR              |
| Designación                                       | EB-A2 06-50C06E150 |
| Diámetro de corte nominal (DC)                    | 1 mm               |
| Número de elementos de filos                      | 2                  |
| Profundidad de corte máxima (APMX)                | 2.5 mm             |
| Diámetro de conexión (DCONMS)                     | 4 mm               |
| Longitud total (OAL)                              | 50 mm              |
| Ángulo de desahogo de viruta (FHA)                | 30°                |
| Tolerancia inferior del radio de esquina (RETOLL) | - 0.004 mm         |
| Tolerancia superior del radio de esquina (RETOLL) | + 0 mm             |
| Velocidad de corte Vc                             | 50 m/mm            |
| Avance por diente fz                              | 0.0157 mm/rev      |