



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**MECANIZADO DE UN MOLDE DE ACERO
PARA FUNDICIÓN EN COQUILLA MEDIANTE
AUTODESK INVENTOR CAM**

Autor:

Matos González, Fernando

Tutor:

Delgado Urrecho, Javier

**CMIM-EGI-IM-ICGMIPF/INGENIERÍA DE LOS
PROCESOS DE FABRICACIÓN**

Valladolid, Julio 2022.



Resumen

La tecnología de la fabricación está en continuo crecimiento. Desde su aparición, hace más de 60 años, los sistemas CAD/CAM han ido evolucionando hasta convertirse hoy en día en una herramienta fundamental en la industria. Estos sistemas permiten grandes ventajas en los procesos de fabricación, aumentando la productividad en las empresas, reduciendo errores en diseños y mecanizados, mejorando así la calidad de los productos finales.

Este trabajo de fin de grado busca verificar la capacidad del software Inventor CAM, quizá no tan sofisticado como otros, para el mecanizado de un molde de acero para fundición en coquilla empleado en la fabricación de piezas de aluminio en muchos sectores de la industria. De este modo, se busca comprobar la utilidad que puede ofrecer este programa en empresas que mecanizan este tipo de moldes o en universidades, para la enseñanza de la tecnología CAD/CAM.

Palabras Clave

INVENTORCAM, FRESADORA, CNC, MOLDE, FUNDICIÓN.



Abstract

Manufacturing technology is continuously growing. Since their appearance more than 60 years ago, CAD/CAM systems have evolved to become a fundamental tool in the industry today. These systems allow great advantages in manufacturing processes, increasing productivity in companies, reducing errors in designs and machining, thus improving the quality of final products.

This final degree project seeks to verify the ability of the Inventor Cam software, perhaps not as sophisticated as others, for the machining of a steel mold for casting, used for the manufacture of aluminum parts in many sectors of the industry. In this way, it seeks to check the utilities that this program can offer in companies that mechanize this type of molds or in universities, for the teaching of CAD / CAM technology.

Keywords

INVENTORCAM, MILLING MACHINE, CNC, MOLD, CASTING.



INDICE

1.	Introducción y objetivos.....	11
1.1	Introducción.....	11
1.2	Objetivos.....	12
1.3	Estructura del trabajo.....	12
2.	Evolución de la tecnología CAD/CAM. Importancia en la actualidad.....	15
3.	Proceso de fundición de metal en molde permanente o coquilla.....	18
4.	Inventor Cam.....	22
4.1	Introducción a Inventor Cam.....	22
4.2	Entorno de trabajo en Inventor.....	23
4.3	Interfaz Autodesk Inventor CAM.....	29
4.4	Proceso general de mecanizado.....	30
4.4.1	Configuración.....	30
4.4.2	Creación de una biblioteca de herramientas personalizada para un mecanizado.....	32
4.4.3	Estrategias de mecanizado.....	35
4.4.4	Simulación y verificación del mecanizado.....	39
4.4.5	Postprocesado.....	44
5.	Mecanizado de un molde de acero para fundición en coquilla.....	45
5.1	Material del tocho de partida.....	45
5.2	Molde a mecanizar.....	47
5.3	Mecanizado con inventor paso a paso.....	48
5.3.1	Abrir archivo .step en Inventor Cam.....	49
5.3.2	Configuración del mecanizado.....	49
5.3.3	Elección de herramientas de corte y creación de una biblioteca de herramientas personalizada.....	51
5.3.4	Planeado de las caras de las coquillas que estarán en contacto.....	54
5.3.5	Desbaste adaptativo inicial.....	60
5.3.6	Desbaste adaptativo para eliminar el material sobrante.....	65
5.3.7	Operaciones de acabado. Horizontal, contorno y paralelo.....	69
6.	Conclusiones.....	83
6.1	Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	83
6.2	Conclusiones personales.....	84



7. Bibliografía	85
7.1 Libros consultados.....	85
7.2 Páginas web consultadas	86
Anexo I. Herramientas de corte.....	89



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de fundición por gravedad en coquilla (PROCESOS DE FUNDICION DE METALES: Fundición En Molde Permanente, s.f.).....	19
Figura 2. Pantalla de inicio Autodesk Inventor	23
Figura 3. Pestañas pantalla de inicio Autodesk Inventor.....	24
Figura 4. Pestaña Herramientas en pantalla de inicio Autodesk Inventor.....	24
Figura 5. Opciones de la aplicación.....	25
Figura 6. Pestaña Cam en pantalla de inicio Autodesk Inventor	25
Figura 7. Opciones CAM.....	26
Figura 8. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor	27
Figura 9. Pestaña modelo 3D en la cinta de opciones	27
Figura 10. Pestaña Boceto en la cinta de opciones	27
Figura 11. Pestaña Anotar en la cinta de opciones	28
Figura 12. Pestaña Inspeccionar en la cinta de opciones	28
Figura 13. Estilo visual en la pestaña Vista de la cinta de opciones	28
Figura 14. Interfaz Autodesk Inventor CAM	29
Figura 15. Pestañas configuración, material y procesamiento posterior dentro de la ventana configuración.	31
Figura 16. Biblioteca de herramientas dentro de Inventor CAM.....	32
Figura 17. Creación de una nueva biblioteca de herramientas dentro de Inventor CAM	33
Figura 18. Opciones de generación de herramientas.....	33
Figura 19. Pestaña “cortador” en la creación de nuevas herramientas.....	34
Figura 20. Pestaña “Avance y velocidad” en la creación de nuevas herramientas	34
Figura 21. Herramientas creadas en una biblioteca personalizada dentro de Inventor CAM .	35
Figura 22. Estrategias de mecanizado en Autodesk Inventor CAM	35
Figura 23. Pestaña “Herramienta” en estrategia de mecanizado	36
Figura 24. Pestaña “geometría” en estrategia de mecanizado	36
Figura 25. Pestaña “alturas” en estrategia de mecanizado	37
Figura 26. Pestaña “pasadas” en estrategia de mecanizado.....	38
Figura 27. Pestaña “vinculación” en estrategia de mecanizado	39
Figura 28. Selección de la opción simular en la cinta de opciones de Autodesk Inventor	40
Figura 29. Pestaña “mostrar” dentro de la ventana simulación.....	40
Figura 30. Pestaña “información” dentro de la ventana simulación	41
Figura 31. Pestaña “estadísticas” dentro de la ventana simulación.....	42
Figura 32. Aspecto ventana gráfica en simulación.....	42
Figura 33. Reproductor de simulación	43
Figura 34. Línea de tiempo del reproductor de simulación	43
Figura 35. Colisiones mostradas en la línea de tiempo del reproductor de simulación	44
Figura 36. Cuadro de diálogo “ejecutar procesamiento posterior”	44
Figura 37: Coquilla fija.....	47



Figura 38: Coquilla móvil 48

Figura 39: Cuadro de dialogo configuracion..... 49

Figura 40: Pestañas “configuración” y “ material” en el cuadro de dialogo configuración..... 50

Figura 41 : Biblioteca de herramientas. 51

Figura 42: Creación herramienta de planeado. Pestaña “cortador”..... 52

Figura 43: Creación herramienta de planeado. Pestaña “Avance y velocidad”..... 53

Figura 44: Árbol de operaciones..... 54

Figura 45: Pestaña “Herramientas” en estrategia planeado..... 55

Figura 46: Pestaña “Geometría” en estrategia planeado..... 56

Figura 47: Pestaña “Alturas” en estrategia planeado 57

Figura 48: Pestaña “Pasadas” en estrategia planeado..... 58

Figura 49: Pestaña “Vinculación” en estrategia planeado 58

Figura 50: Trayectorias estrategia de planeado 59

Figura 51: Captura durante la simulación de la estrategia de planeado..... 59

Figura 52: Pestañas verificación y estadísticas dentro de la simulación 60

Figura 53: Pestaña “herramienta” en estrategia desbaste adaptativo inicial 61

Figura 54: Pestaña “geometría” en estrategia desbaste adaptativo inicial 62

Figura 55: Pestaña “Alturas” en estrategia desbaste adaptativo inicial..... 62

Figura 56: Pestaña “pasadas” en estrategia desbaste adaptativo inicial 63

Figura 57: Pestaña “vinculación” en estrategia desbaste adaptativo inicial..... 64

Figura 58: Trayectorias seguidas por la herramienta en desbaste adaptativo inicial. 64

Figura 59: Simulación final tras operaciones de planeado y desbaste inicial. 65

Figura 60: Pestaña “herramienta” en estrategia desbaste adaptativo restante 66

Figura 61: Pestaña “geometría” en estrategia desbaste adaptativo restante 66

Figura 62: Pestaña “alturas” en estrategia desbaste adaptativo restante 67

Figura 63: Pestaña “pasadas” en estrategia desbaste adaptativo restante 67

Figura 64: Pestaña “vinculación” en estrategia desbaste adaptativo restante..... 68

Figura 65: Trayectorias estrategia desbaste adaptativo restante 68

Figura 66: Captura tras simulación de las operaciones de desbaste del molde. 69

Figura 67: Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado horizontal 70

Figura 68: Pestaña “geometría” en estrategia de acabado horizontal..... 70

Figura 69: Pestaña “alturas” en estrategia de acabado horizontal..... 71

Figura 70: Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado horizontal 71

Figura 71: Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado horizontal 72

Figura 72: Trayectorias de la estrategia de acabado horizontal..... 72

Figura 73 : Simulacion mecanizado del molde hasta operación de acabado Horizontal 73

Figura 74 : Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado “contorno” 74

Figura 75 : Pestaña “geometría” en estrategia de acabado “contorno” 74

Figura 76 : Pestaña “alturas” en estrategia de acabado “contorno”..... 75

Figura 77 : Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado “contorno” 75

Figura 78 : Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado “contorno” 76

Figura 79 : Simulacion mecanizado molde hasta operación de acabado “contorno” 76



Figura 80 : Simulación mecanizado molde hasta operación de acabado “contorno”	77
Figura 81 : Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado “paralelo”	77
Figura 82 : Pestaña “geometría” en estrategia de acabado “paralelo”	78
Figura 83 : Pestaña “alturas” en estrategia de acabado “paralelo”	78
Figura 84 : Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado “paralelo”	79
Figura 85 : Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado “paralelo”	79
Figura 86 : Trayectorias estrategia de acabado “paralelo”	80
Figura 87 : Simulación mecanizado del molde hasta operación de acabado “paralelo”	80
Figura 88 : Resultado final simulación coquillas fija y móvil	81
Figura 89 : Ventana postprocesado para obtención del código de control numérico	82
Figura 90: Medidas geométricas portaherramientas	89
Figura 91: Medidas geométricas plaquita	91
Figura 92 : Medidas geométricas fresa enteriza	93
Figura 93 : Medidas geométricas adaptador fresa.....	95
Figura 94: Medidas geométricas fresa	96
Figura 95: Medidas geométricas fresa esférica enteriza	98



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



1. Introducción y objetivos

1.1 Introducción

En este trabajo de fin de grado se va a realizar el mecanizado de las dos partes de un molde de acero, empleado para la fundición de aluminio por gravedad, a través del software Inventor CAM. Se comprobará si este software está preparado para realizar este tipo de mecanizado, el cual se lleva a cabo mediante estrategias de fresado en 3 ejes debido a las superficies complejas de las piezas que se fabrican con estos moldes y la necesidad de una mayor calidad en el acabado superficial.

Este trabajo comienza con una introducción a la evolución de la tecnología CAD/CAM, la cual forma parte fundamental del aprendizaje impartido en las universidades, pues es una tecnología en constante crecimiento, que ha supuesto una importante mejora en los procesos de fabricación, siendo indispensable a día de hoy en la industria.

Así mismo, se comentará brevemente uno de los procesos de fabricación más antiguos como es la fundición de metales, en concreto la fundición en molde permanente o coquilla. Se verá la importancia de este tipo de proceso de fabricación en la industria y sus aplicaciones.

Por otro lado, se va a realizar una introducción al software Inventor CAM, veremos las distintas opciones que ofrece dicho programa en la tecnología CAM (fabricación asistida por ordenador), concretamente en el módulo de fresado.

Finalmente, se realizarán las simulaciones del mecanizado de las coquillas con Inventor CAM y se sacarán conclusiones sobre la posible utilidad de este software para este tipo de trabajos.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es verificar las capacidades del software Inventor CAM para el mecanizado de moldes, en concreto de un molde permanente de acero o coquilla utilizado para la fundición de aluminio. Se busca comprobar si este software está preparado para realizar este tipo de mecanizados, los cuales emplean estrategias de fresado continuo en 3 ejes para el mecanizado de las superficies complejas de la cavidad del molde.

Es cierto que, a priori, hay softwares más completos en este ámbito, con una mayor cantidad de herramientas, que permiten una mayor precisión en los diseños, análisis y simulaciones de mecanizado, como pueden ser CATIA, solidworks, Mastercam o Nx CAM, entre otros. Por ello, vamos a comprobar si Inventor CAM está realmente preparado para desarrollar este tipo de mecanizados con solvencia sin necesidad de acudir a otros softwares.

Se va a mostrar cual es el proceso de mecanizado general con este programa, como crear una biblioteca de herramientas, generar trayectorias en tres ejes, simular el mecanizado para verificar posibles errores o colisiones que se puedan producir y, finalmente, obtener el código de control numérico que necesita la máquina para desarrollar el mecanizado.

1.3 Estructura del trabajo

Este trabajo de fin de grado consta de 5 capítulos. Este primer capítulo es una introducción al trabajo realizado así como la descripción de los objetivos y justificación del mismo.

El segundo capítulo es una breve introducción a la tecnología CAD/CAM en el cual se explica en que consiste esta tecnología y cual es su evolución e importancia en la actualidad.

El tercer capítulo trata del proceso de fundición por gravedad en molde permanente o coquilla, por lo tanto en este capítulo se verá en que consiste este proceso de fabricación y que aplicaciones tiene en la industria.

El cuarto capítulo es una introducción básica a las herramientas necesarias para realizar un proceso general de mecanizado en Inventor CAM. Se conocerá como configurar un proceso de mecanizado, como crear una biblioteca de herramientas personalizada para el mismo, generar trayectorias en tres ejes,



simular el mecanizado para verificar posibles errores o colisiones y, finalmente, obtener el código de control numérico que necesitamos enviar a la máquina para realizar el mecanizado.

Por último, en el capítulo 5, se desarrolla el objetivo principal de este trabajo. En él se muestra la simulación del mecanizado de las coquillas de acero con el uso de inventor CAM para el fresado en tres ejes. Se podrán comprobar posibles errores o colisiones y solucionarlos antes de generar el código CNC.

Finalmente se realizará una valoración final sobre si este software está capacitado para la realización de este tipo de trabajos, siendo una posible opción para empresas en el mecanizado de estos moldes. Además se comentará su posible utilidad en las universidades, como software de apoyo para la enseñanza de tecnología CAD/CAM.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

2. Evolución de la tecnología CAD/CAM. Importancia en la actualidad.

Antes de empezar a conocer este software, es importante hablar sobre la tecnología CAD/CAM. ¿En qué consiste esta tecnología? ¿Qué utilidad tiene para la industria? ¿Cómo surgió y cuál ha sido su evolución hasta el día de hoy?

El acrónimo CAD (Computer Aided Design, por sus siglas en inglés) hace referencia al diseño asistido por ordenador. De la misma forma, el acrónimo CAM (Computer Aided Manufacturing, por sus siglas en inglés) hace referencia a la fabricación asistida por ordenador.

Hasta la década de 1960, las empresas de arquitectura, fabricación e ingeniería contaban con dibujantes, los cuales realizaban su trabajo de forma manual con lápices, empleando compases, transportadores, escuadras, cartabones, creando diseños con un gran detalle. Su trabajo se basaba en pasar de los bocetos preliminares de otros profesionales (tales como ingenieros) a dibujos técnicos.

Esto se mantuvo sin cambios durante siglos hasta la aparición del CAD (diseño asistido por ordenador) en la segunda mitad del siglo XX. (*The History - and Future - of CAD/CAM Technology*, s.f.)

A partir de ese momento, las tecnologías CAD/CAM han ido evolucionando constantemente en sus más de 60 años de historia, consolidándose como una tecnología indispensable en la actualidad y que sigue en continuo desarrollo.

Lo que antes se realizaba por medio de planos, ahora se hace por medio electrónico, utilizando ordenadores que ejecutan cálculos y evitan errores. El ordenador se ha vuelto protagonista en todos los ámbitos de la vida, siendo su impacto en el sector industrial muy importante. El uso del ordenador simplificó muchos procesos de fabricación tradicionales. Actualmente parece casi imposible que una industria manufacturera pueda sobrevivir sin él. (Nageswara Rao, 2010)

Pero en sus inicios, la tecnología CAD/CAM era muy costosa y no todas las empresas podían acceder a ella. En la actualidad, con el desarrollo de los ordenadores, esto ha cambiado permitiendo a las pequeñas y medianas empresas utilizar esta tecnología en sus trabajos diarios buscando una mejora en su productividad.

Su impacto en industrias como la del automóvil, la marina o la aeroespacial ha sido muy importante, mejorando la calidad del producto, aumentando la productividad y flexibilidad del proceso y reduciendo costes.



Podemos definir el diseño asistido por ordenador como el uso de sistemas informáticos que sirven de apoyo para la creación, modificación, o análisis de un diseño.

Cuando hablamos de sistemas informáticos, nos referimos al hardware y software utilizados para realizar el diseño requerido. El hardware, como sabemos, incluye los elementos físicos tales como el ordenador, el teclado, el ratón o la pantalla gráfica, y el software son los programas informáticos para implementar gráficos por ordenador.

El diseño asistido por ordenador implica por tanto, cualquier actividad de diseño que utiliza el ordenador para desarrollar, modificar o analizar un diseño de ingeniería. (SARCAR, MALLIKARHUNA RAO, & LALIT NARAY, 2008)

Por tanto, ¿Qué motivos llevan a las empresas a implementar estos sistemas CAD?

Estos sistemas se han convertido en una parte fundamental en los procesos de fabricación en la actualidad debido a las ventajas que ofrecen:

- **Aumento de la productividad:** se reduce el tiempo empleado en realizar los diseños gracias a las herramientas de las que disponen estos sistemas. Es mucho más rápido y preciso que los métodos tradicionales.
- **Mayor calidad de los diseños:** el sistema CAD permite un gran análisis del diseño utilizando diversas herramientas, reduciendo errores de diseño y mejorando la calidad y precisión de los mismos.
- **Mejor documentación de los diseños:** el uso de CAD produce diseños con una mejor documentación. Es posible manipular dimensiones y distancias de los elementos de dibujo. La modificación de un modelo es muy fácil y mucho más rápida.
- **Creación de una base de datos para la fabricación:** esta base de datos incluye todos los datos del producto generados en el diseño, es decir datos de geometría, dimensiones, materiales, ensamblajes, etc. En un sistema CAD/CAM se establece un vínculo directo entre el diseño y la fabricación, por lo que esta información será fundamental para la fabricación.
- **Visualización 3D** para que los diseñadores puedan observar el diseño de los productos desde varias orientaciones distintas.



Por otro lado, CAM (fabricación asistida por ordenador), integrada junto con CAD, ofrece, entre otras, las siguientes ventajas:

- Aumento de la productividad debido a la posibilidad de realizar una simulación virtual del proceso de fabricación antes de llevarlo a la práctica, lo cual permite optimizar el tiempo de mecanizado del producto y evitar errores.
- Mayor flexibilidad en la realización de proyectos.
- Reducción de los plazos de entrega en la fabricación.
- Reducción de costes.
- Mayor calidad y precisión de los productos.
- Reducción de operaciones de acabado posteriores.
- Mejor control de la actividad de fabricación.
- Mayor seguridad debido a la menor intervención del operario en el mecanizado.

(Nageswara Rao, 2010)

La tecnología de la fabricación está en un crecimiento constante. Cada vez aumentan más los requisitos de calidad de los productos así como la tasa de fabricación de los mismos, por lo que la tecnología CAD/CAM en la actualidad es una herramienta fundamental en las empresas de fabricación, aumentando considerablemente la productividad de las mismas, permitiendo la rápida creación de códigos de control numérico para piezas con superficies complejas. (Dodok et al., 2017)

3. Proceso de fundición de metal en molde permanente o coquilla

En este tercer capítulo se va a realizar una breve introducción al proceso de fabricación por fundición de aluminio en coquilla o molde permanente.

Los moldes de acero que se mecanizarán con la ayuda de Inventor CAM serán utilizados para la fundición de aluminio, con el objetivo de fabricar grandes series de piezas metálicas mediante este proceso de fabricación. Por tanto, antes de comenzar con el mecanizado, se va a ver en qué consiste este proceso de fabricación, y que aplicaciones tiene en la actualidad para la industria.

De este modo se verá la utilidad que puede tener este tipo de software, más económico y menos sofisticado que otros que son más utilizados por las empresas, para mecanizar moldes de acero para fundición.

El proceso de fundición de metales en moldes es una de las actividades industriales más antiguas para la obtención de piezas metálicas. La evolución de este proceso de fabricación es parte del desarrollo histórico de la humanidad.

A través de la fundición se pueden fabricar piezas metálicas de gran complejidad, con diferentes formas y tamaños y de forma sencilla. Este método de fabricación es realmente útil para la obtención de piezas cuyas características no las hacen adecuadas para ser fabricadas por otros procesos de mecanizado.

La fundición es el proceso más utilizado en la fabricación de piezas para la construcción de maquinaria. *(El Proceso de Fundición | ESingeneria.Pro, s.f.)*

Los procesos de fundición de metales se pueden clasificar en torno a muchos criterios. Uno de los más utilizados es en función del tipo de molde utilizado:

- **Moldes desechables:** este tipo de moldes tienen que romperse para obtener la pieza final del molde de forma que es necesario crear un nuevo molde para cada proceso de fundición. Es por ello que su velocidad de producción está más limitada ya que se necesita más tiempo para la creación del molde que para el proceso de fundición.
- **Moldes permanentes o coquilla:** son moldes construidos normalmente en acero o hierro fundido, los cuales son reutilizables y sirven para la obtención de grandes series de piezas por fundición. Por tanto, la ventaja de este método respecto al molde desechable es su mayor productividad y la desventaja su mayor coste.

En este trabajo se va a introducir brevemente el proceso de fundición de metales en coquilla o molde permanente.

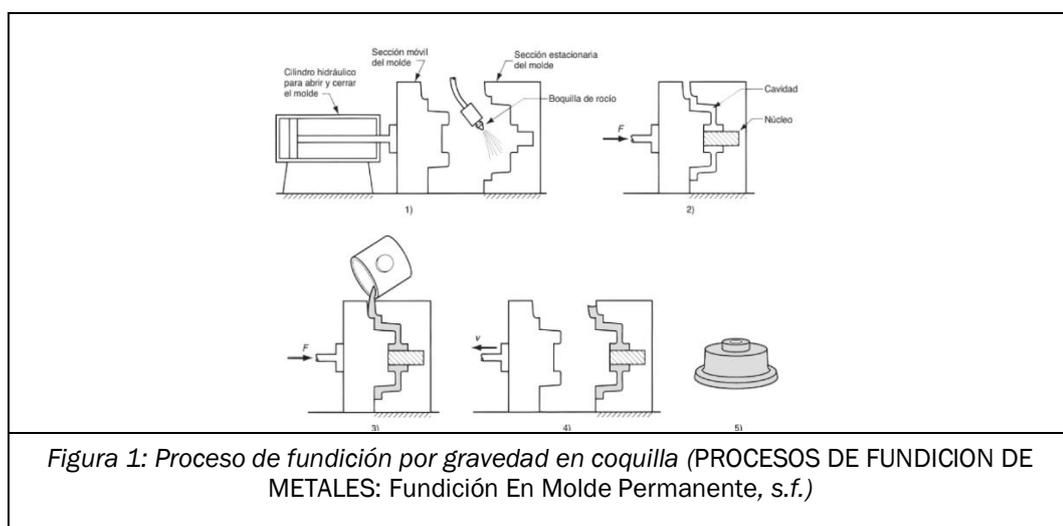
Este proceso está orientado a grandes volúmenes de producción de forma que salga rentable el coste de la obtención de moldes permanentes.

La fundición en coquilla o molde permanente es un proceso donde el vertido se realiza por gravedad. Se utiliza mucho en la fabricación de piezas hechas de metales no ferrosos como aleaciones de aluminio, cobre, zinc o magnesio. El molde suele estar dividido en dos partes, coquilla fija y coquilla móvil, los cuales, al unirse, darán la forma final de las piezas obtenidas.

Los moldes suelen manipularse manualmente pero, para grandes volúmenes de producción, las empresas cuentan con mecanismos neumáticos o hidráulicos para abrir y cerrar los mismos. La colada y las operaciones de acabado continúan realizándose de forma manual. (*Moldeo Por Gravedad - Proceso y Aplicaciones - Gestión De Compras, s.f.*)

Las coquillas metálicas suelen ser normalmente de acero o hierro fundido y están formadas por:

- El cuerpo del molde, el cual será el encargado de dar la forma exterior de la pieza final. El molde suele estar formado por dos partes llamadas coquillas que al unirse dan la forma final de la pieza y permiten el desmoldeo de la misma.
- Los machos, cuya función es reproducir las partes o entrantes de las piezas, y que pueden ser metálicos (con forma ligeramente cónica para ayudar a la extracción) o de arena. (*3.1.3.- Moldes Permanentes. Coquillas. | DMMF04.- Materiales Para La Fabricación de Moldes y Modelos de Fundición., s.f.*)



En la Figura 1 se puede ver el proceso general de fundición de metal por gravedad en coquilla:

En la imagen 1) se precalienta el molde o coquilla para evitar choques térmicos al vertir la colada y se recubre las paredes del molde con un lubricante refractario para ayudar al posterior desmoldeo de las piezas.

En la imagen 2) se insertan los núcleos (si es que hubiese) y se cierran las dos partes del molde mediante un cilindro hidráulico.

En la imagen 3) se vierte la colada en el interior del molde y se deja enfriar.

En 4) se abre el molde para desmoldear la pieza final con ayuda del cilindro hidráulico.

Por último, en 5) podemos observar la pieza final.

A la hora de diseñar un molde para fundición de metales han de tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- La fundición, una vez solidificada, debe poderse retirar fácilmente de la cavidad del molde. Para ello es necesario que las superficies de la cavidad tengan ángulos de salida en la dirección de apertura del molde. También se utilizan diseños de molde de partes múltiples para ayudar al desmoldeo.
- La cavidad del molde se realiza utilizando mecanizados de precisión con el objetivo de obtener un gran acabado y precisión superficial.
- Los moldes suelen refrigerarse por medio de conductos a través de los cuales circula un refrigerante o mediante aletas disipadoras.
- En muchos casos se utilizan pernos expulsores para retirar la fundición solidificada.
- Las caras de los moldes deben tener respiraderos que permitan el escape del aire y gases desplazados por el metal fundido.
- El molde tiene que soportar el choque térmico y la abrasión que se produce durante la colada. Por ello se debe elegir el tipo de material adecuado para el molde, teniendo en cuenta sus características.
- La elección del material del molde también tiene relación con el material de la fundición que será vertido en él, pues debe tener, lógicamente un mayor punto de fusión.

(PROCESOS DE FUNDICION DE METALES: Fundición En Molde Permanente, s.f.)

Este proceso de fabricación tiene grandes ventajas:

- Permite obtener series largas de producción debido a la durabilidad del molde permanente en comparación a otros procesos de fundición como la fundición en molde de arena, en la cual es necesario destruir el molde para desmoldear la pieza.
- Gran precisión dimensional y acabado superficial.
- Disminución de la necesidad de realizar maquinados posteriores debido precisamente al buen acabado superficial de las piezas obtenidas con este proceso.
- La inserción de núcleos en los moldes es más sencilla que en otros procesos como la fundición en molde de arena.
- La velocidad de solidificación del material, debido a un mayor poder de transmisión térmico, genera una estructura de grano más fino mejorando las propiedades mecánicas de las piezas.

(Fundición En Molde Metálico – Fundalco, s.f.)

Pero también existen desventajas:

- Para series pequeñas los costes son muy grandes por lo que es necesario evaluar el volumen de producción necesario antes de fabricar mediante este proceso.
- Mayor limitación en la fabricación de superficies complejas en comparación a la fundición en molde de arena pues en esos procesos el molde se destruye para la obtención de las piezas.
- A diferencia del molde de arena, las coquillas no son permeables.

Aplicaciones de la fundición en molde permanente

Este proceso se utiliza principalmente para la fabricación de gran cantidad de piezas en serie, es por ello que uno de sus mayores usos está en la industria del automóvil para la fabricación de grandes series de piezas metálicas como turbos, pinzas de freno, culatas de motores, pistones, bielas, etc. También es altamente utilizado para la fabricación de piezas de componentes para iluminación, fontanería, electrodomésticos o utensilios de cocina. *(Tipos de Fundición de Metales | Proceso y Aplicación de Fundición de Metales., s.f.)*

La fundición en molde de arena, en cambio, es ideal para la fabricación de pequeñas series de piezas complejas debido a la destrucción del molde en cada vertido.

4. Inventor Cam

4.1 Introducción a Inventor Cam.

Inventor CAM, antiguamente conocido como Inventor HSM, es un complemento integrado en el software Inventor desarrollado por la compañía Autodesk.

El software Inventor CAM se ha diseñado para su funcionamiento dentro de Inventor, lo cual proporciona una extensión lógica del entorno de Inventor paramétrico con respecto a la tecnología CAM. De esta forma se obtiene en un mismo entorno toda la tecnología CAD/CAM integrada para el desarrollo de productos desde la etapa de diseño hasta la fabricación de los mismos.

Esto supone grandes beneficios, pues evita tener que importar o exportar modelos a otros programas, realizando pasos adicionales en el proceso de trabajo que nos pueden llevar a cometer errores. De este modo se mejora la calidad del diseño y se reduce el tiempo de desarrollo de los productos. Además cualquier cambio en el diseño del producto se verá reflejado automáticamente en las estrategias de mecanizado generadas, lo cual no sucedería si utilizáramos otros softwares externos para el mecanizado.

Por tanto se obtiene un flujo de trabajo perfecto para el desarrollo de los productos en todas sus fases al disponer de todas las herramientas CAD/CAM en un mismo entorno.

Inventor CAM permite realizar múltiples operaciones de mecanizado tales como:

- Estrategias de fresado 2.5D
- Estrategias de fresado 3D
- Estrategias de fresado en 5 ejes simultáneos y fresado 3+2
- Estrategias de torneado
- Corte por chorro de agua, láser o plasma.

4.2 Entorno de trabajo en Inventor

Este trabajo de fin de grado se centra principalmente en el mecanizado con Inventor CAM, especialmente en la parte de fresado 3D, por lo que primero se va a comentar brevemente la interfaz del programa antes de adentrarse exclusivamente en el apartado CAM.

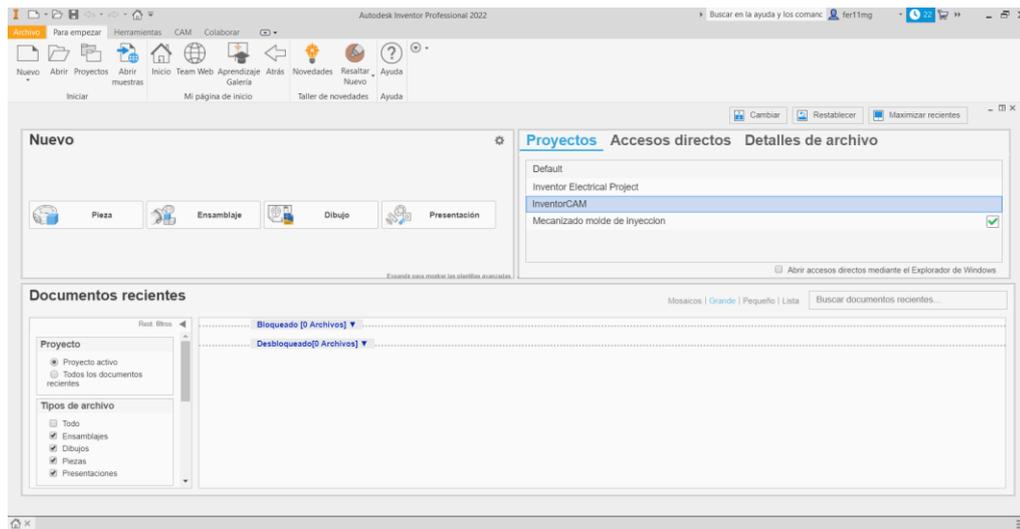


Figura 2. Pantalla de inicio Autodesk Inventor

Se va a comenzar viendo un poco la interfaz de inventor, para conocer funciones básicas como abrir un archivo o crear uno nuevo, antes de empezar con la parte CAM del mismo.

Al abrir el programa lo primero que se ve es la pantalla de inicio del mismo, en la cual se pueden observar distintas secciones, como se muestra en la Figura 2.

- La sección “**nuevo**” permite crear una nueva pieza, ensamblaje, dibujo 2D o una presentación utilizando las plantillas que trae el software por defecto.
- La sección “**Proyectos/accesos directos/detalles de archivo**”. La creación de un proyecto permite organizar los archivos que están asociados a un trabajo de manera que se pueda acceder a ellos de una forma más fácil. En esta sección se muestran todos los proyectos que se hayan creado, el proyecto activo actualmente, accesos directos a carpetas o páginas web que se vayan a utilizar mucho, para poder acceder a ellas fácilmente y también se muestran los detalles de los archivos seleccionados en el área “documentos recientes”.

- La sección “**Documentos recientes**” donde se mostrarán los archivos abiertos recientemente. Dispone de una ventana en la parte izquierda donde se puede filtrar la búsqueda de estos archivos según el tipo de archivo, el proyecto, fecha de modificación, nombre, ubicación, tamaño etc. También se puede hacer click en el símbolo  para fijar el archivo y que aparezca siempre en la parte superior del área “documentos recientes”.

En la parte superior de esta pantalla aparecen también una serie de pestañas que permiten realizar diferentes acciones.

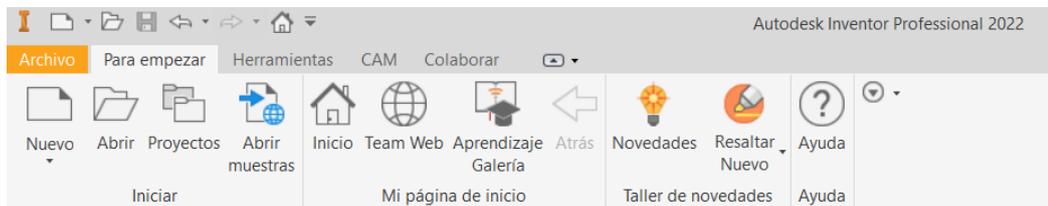


Figura 3. Pestañas pantalla de inicio Autodesk Inventor.

Si se quiere abrir un archivo ya creado, un archivo nuevo o crear un proyecto, se puede hacer en la pestaña “para empezar” o desde la pestaña “archivo”, como se muestra en la Figura 3. Esta pestaña permite además abrir muestras, acceder a una galería de aprendizaje o a la ayuda de Inventor entre otras opciones.

En la pestaña “Herramientas” se puede acceder a las opciones de la aplicación, donde configurar la interfaz y las opciones de inventor.

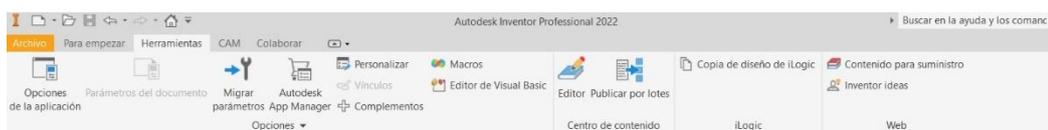


Figura 4. Pestaña Herramientas en pantalla de inicio Autodesk Inventor

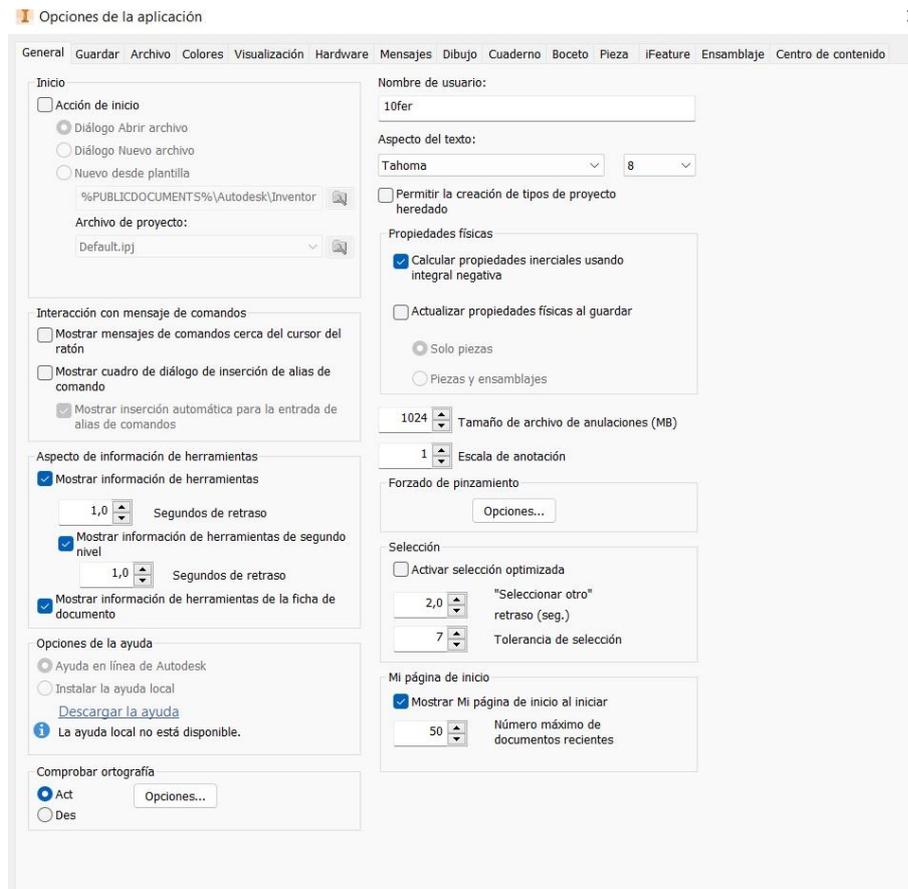


Figura 5. Opciones de la aplicación.

La pestaña CAM ofrece la posibilidad de crear archivos nuevos o abrir ya existentes así como acceder a las opciones de CAM, a la biblioteca de herramientas, a opciones de aprendizaje a través de vídeos en youtube, examinar ejemplos ya creados y acceder a la ayuda de Autodesk Inventor.

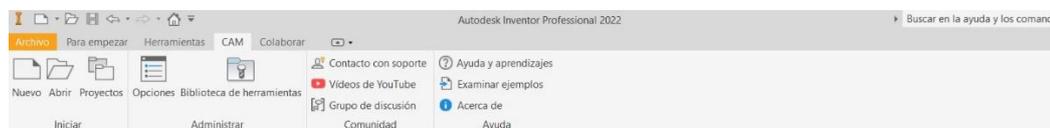


Figura 6. Pestaña Cam en pantalla de inicio Autodesk Inventor

Dentro de las opciones de CAM se puede, entre otras muchas opciones, cambiar el idioma del programa en la interfaz CAM.

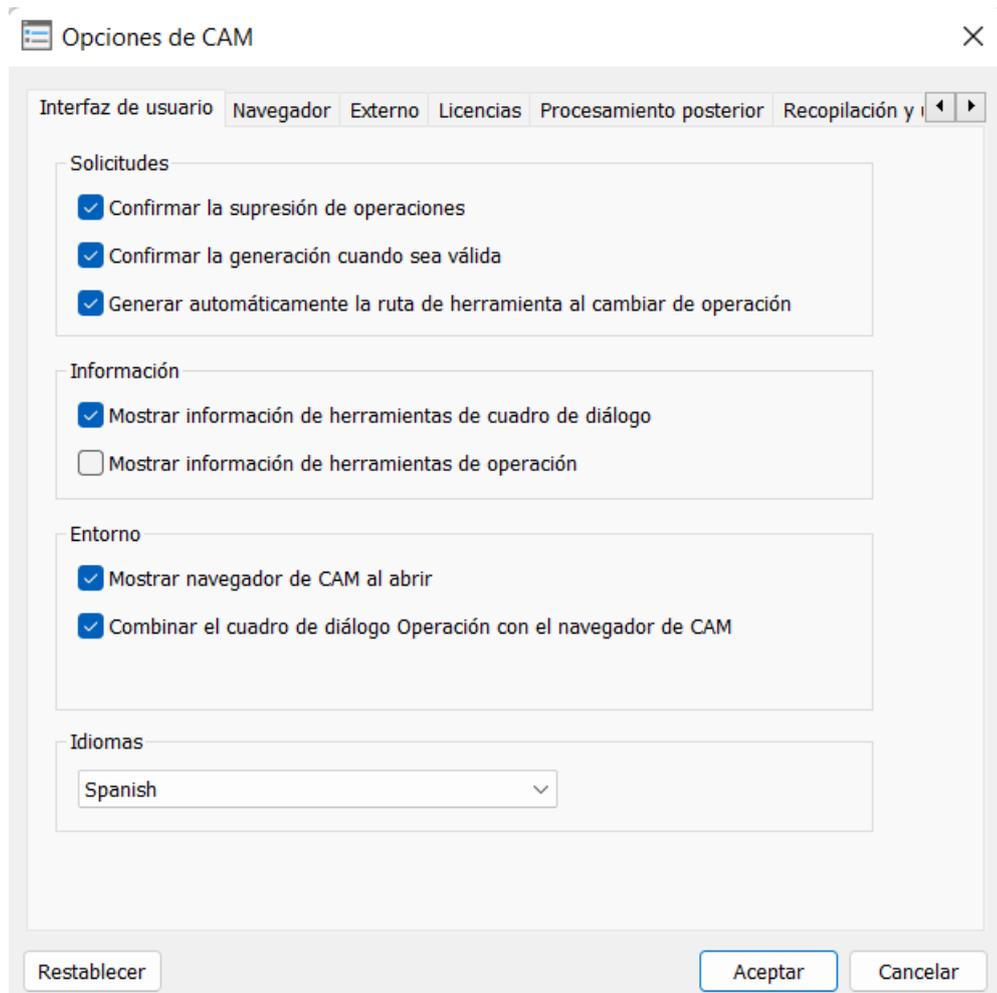


Figura 7. Opciones CAM

Una vez se abre un archivo o se crea uno nuevo, la interfaz del programa se actualiza con multitud de herramientas para poder realizar desde el diseño de una pieza (CAD) hasta el mecanizado y simulación de la misma (CAM).

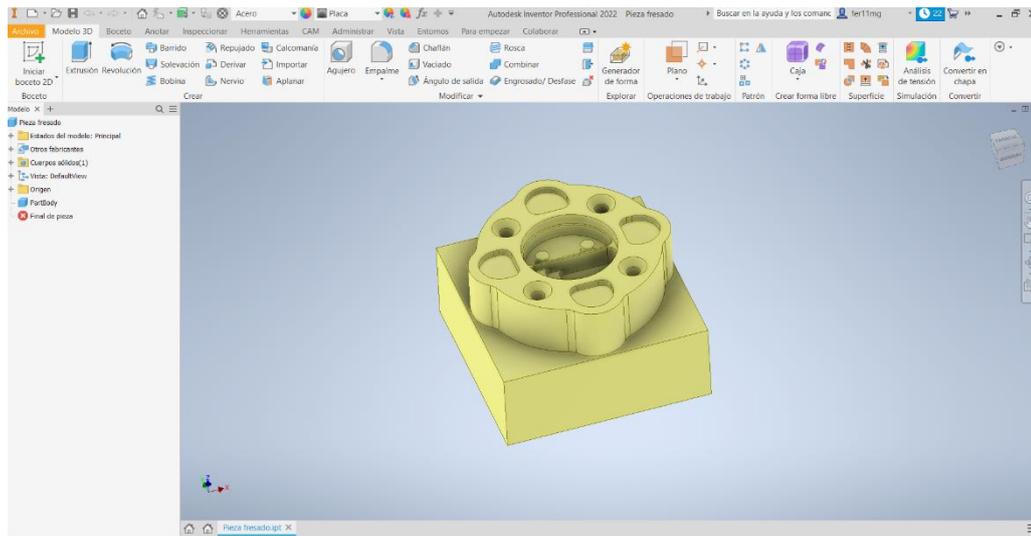


Figura 8. Entorno de trabajo en Autodesk Inventor

En la parte superior de la Figura 8 se visualiza la cinta con todas las opciones que ofrece el programa. Esta cinta de opciones está dividida en pestañas, las cuales a su vez se dividen en paneles. En la parte izquierda de la Figura 8 está el navegador del modelo.

Las pestañas de “modelo 3D” y “boceto” nos proporcionan herramientas para realizar el diseño de las piezas (CAD), como se puede apreciar en la Figura 9 y la Figura 10.

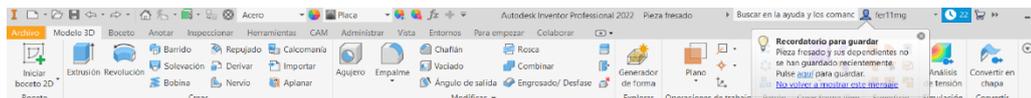


Figura 9. Pestaña modelo 3D en la cinta de opciones

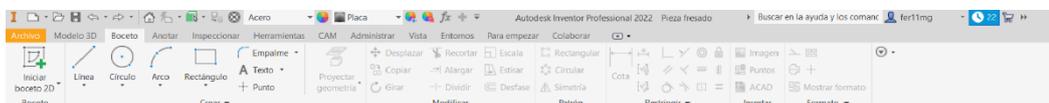


Figura 10. Pestaña Boceto en la cinta de opciones

La pestaña “anotar” permite, entre otras opciones, añadir a los bocetos las acotaciones y tolerancias.

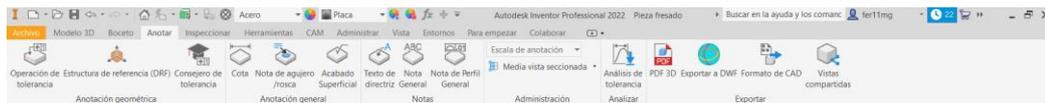


Figura 11. Pestaña Anotar en la cinta de opciones

La Figura 12 muestra la pestaña “inspeccionar”, la cual dispone de herramientas que permiten medir distancias del modelo, así como realizar análisis de superficie, curvatura o tolerancia.



Figura 12. Pestaña Inspeccionar en la cinta de opciones

En la pestaña “vista” se puede desactivar o activar la visibilidad de bocetos, ejes de trabajo, cotas de boceto, seleccionar vistas seccionadas de una pieza o el estilo visual de la misma, entre otras muchas más opciones.

Es importante establecer el estilo visual en sombreado con aristas, pues puede ser de ayuda al seleccionar referencias y revisar operaciones de mecanizado en el entorno CAM.

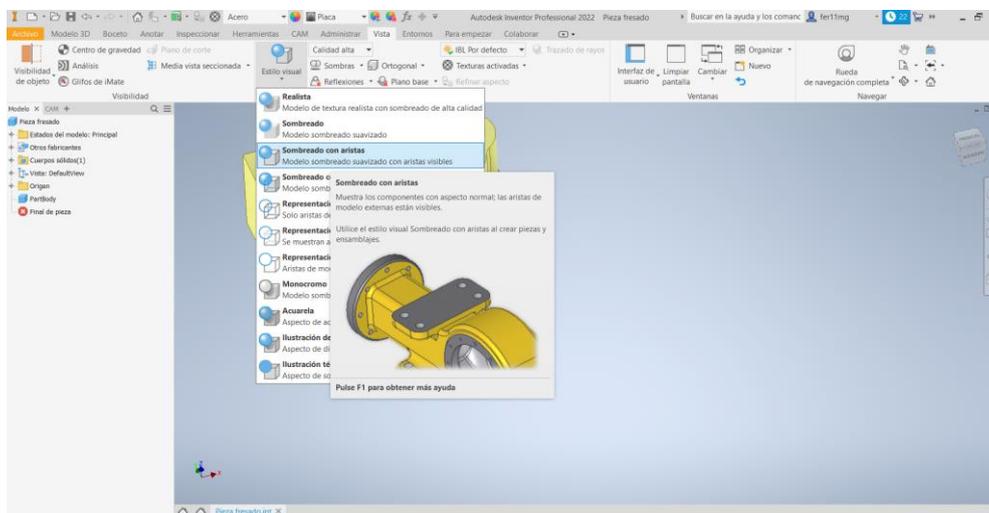


Figura 13. Estilo visual en la pestaña Vista de la cinta de opciones

Una vez visto de forma genérica la interfaz de Inventor, se va a acceder a inventor CAM, entorno donde se desarrollará el mecanizado del molde, objetivo de este trabajo. Se accede a él a través de la pestaña CAM en la cinta de opciones, como se aprecia en la Figura 14.

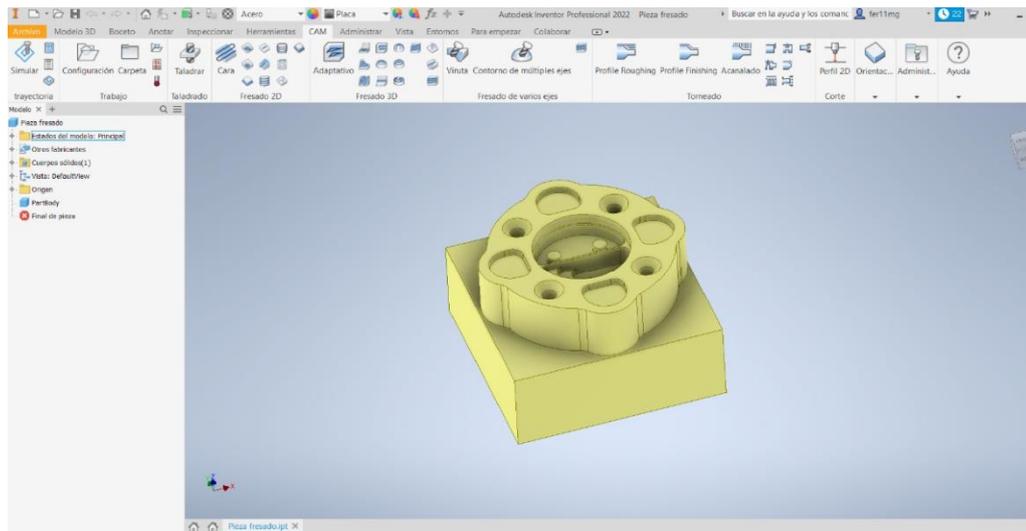


Figura 14. Interfaz Autodesk Inventor CAM

Este trabajo está enfocado en las estrategias de fresado 3D en Inventor CAM por lo que se va a ver como sería un proceso de mecanizado general en este software.

4.3 Interfaz Autodesk Inventor CAM

Como se ha comentado, Inventor Cam está integrado dentro de Autodesk Inventor y completa el flujo de trabajo CAD/CAM en un mismo entorno tan importante hoy en día para la fabricación de piezas, ya que permite, en un mismo programa, realizar el diseño 3D de la pieza que se va a fabricar, generar las trayectorias de mecanizado de la misma y realizar la simulación, permitiendo así comprobar posibles errores en el proceso, conocer el tiempo de mecanizado total y de cada operación, de manera que se puedan modificar parámetros del mecanizado para disminuir dicho tiempo para, en definitiva, optimizar al máximo de forma virtual el mecanizado antes de llevarlo a cabo.

En este trabajo no se va a trabajar en el entorno CAD de Inventor ya que el modelo del molde que se mecanizará ha sido proporcionado en formato .Step. Por tanto solo se va a trabajar en la interfaz CAM que tiene integrada Inventor.

Al entorno de fabricación asistida por ordenador de Inventor se accede a través de la pestaña CAM disponible en la cinta de opciones del programa. Dentro de dicha pestaña, se pueden ver todas las estrategias de mecanizado que permite crear Inventor CAM tales como fresado desde 2.5 a 5 ejes, estrategias de torneado y estrategias de perfil 2D para el corte por chorro de agua, plasma o láser. También se pueden ver las opciones de simulación que ofrece el programa y la biblioteca de herramientas proporcionada.

4.4 Proceso general de mecanizado

Para cualquier proceso de mecanizado se deben seguir los siguientes pasos en Inventor CAM:

1. Se crea la configuración. Este primer paso es muy importante, pues se va a elegir el tipo de operación a realizar (fresado, torneado, etc.), la máquina en la que se va a llevar a cabo, se definirá el tocho de partida con sus dimensiones antes del mecanizado, se seleccionarán los sistemas de amarre de la pieza y se establecerá el origen y orientación del SCT (sistema de coordenadas de trabajo).
2. Se crea una biblioteca personalizada donde almacenar las herramientas seleccionadas para el mecanizado.
3. Se seleccionan las operaciones adecuadas para crear el mecanizado de nuestra pieza, estableciendo las herramientas a usar en cada operación y los parámetros de corte idóneos.
4. Se simulan las trayectorias de las herramientas en cada operación para verificar que se produzcan con éxito, eliminando todo el material necesario, y que no haya colisiones entre la herramienta, la pieza, el sistema de sujeción y las partes de la máquina.
5. Postprocesado. Se genera el código CNC que se enviará a la máquina con las instrucciones para realizar el mecanizado.

4.4.1 Configuración

Se accede a la configuración del mecanizado dentro de la pestaña CAM en el panel "trabajo". Haciendo click en el icono  aparece un cuadro de diálogo con las pestañas mostradas en la Figura 15.

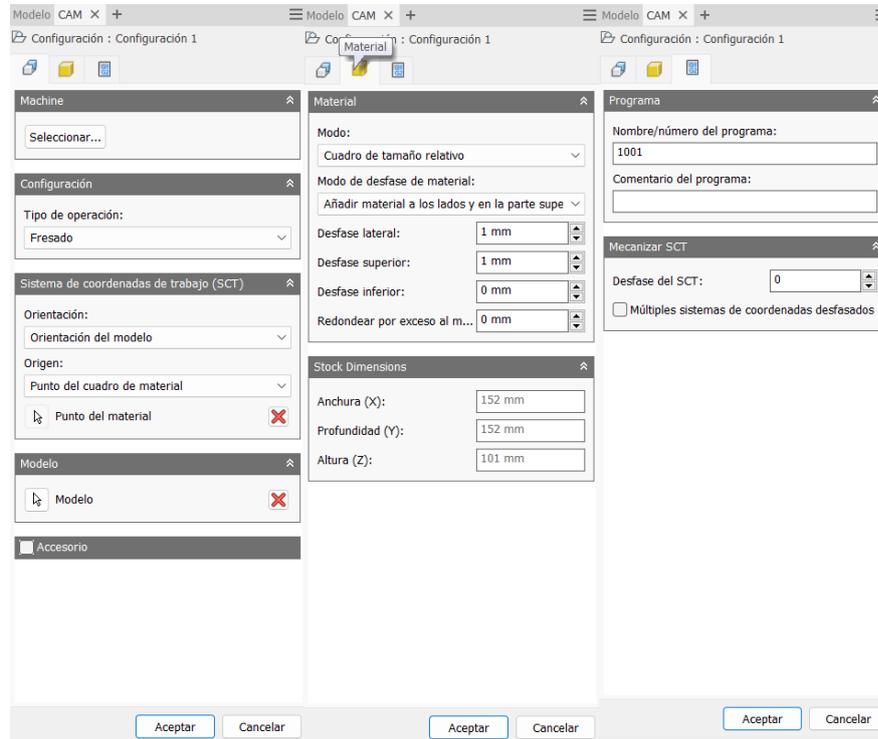


Figura 15. Pestañas configuración, material y procesamiento posterior dentro de la ventana configuración.

La ventana de configuración está dividida en tres pestañas:

- **Pestaña configuración:** en ella hay que seleccionar la máquina que emplearemos, el tipo de operación, el origen y orientación del SCT, el modelo final que se va a mecanizar y los sistemas de sujeción (si se quieren añadir a la simulación).
- **Pestaña material:** se configura el material de partida inicial antes de mecanizar, con sus dimensiones reales.
- **Pestaña procesamiento posterior:** Se define el nombre/número del programa CNC y se puede añadir un comentario del mismo.

4.4.2 Creación de una biblioteca de herramientas personalizada para un mecanizado

Antes de empezar a generar las estrategias de mecanizado, necesarias para la obtención de la pieza final, sería muy útil crear una biblioteca personalizada para almacenar las herramientas que se van a utilizar y tenerlas así ordenadas en un mismo espacio donde poder acceder rápidamente para seleccionarlas.

Para ello, en primer lugar, se debe acceder a la biblioteca de herramientas, haciendo click en el icono  situado dentro de la pestaña CAM en la cinta de opciones de Inventor. Aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 16.

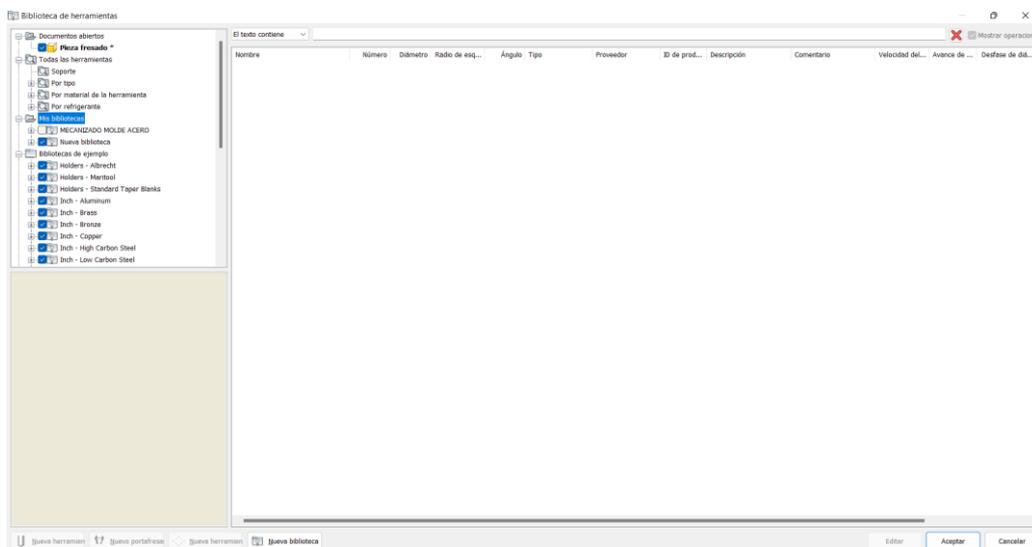


Figura 16. Biblioteca de herramientas dentro de Inventor CAM

Dentro del apartado “mis bibliotecas” situado en la cinta de opciones que aparece a la izquierda de la pantalla se puede crear una nueva biblioteca personalizada donde almacenar las herramientas que serán utilizadas en un determinado proceso de mecanizado.

Situando el cursor sobre “mis bibliotecas” y haciendo click derecho aparecen diferentes opciones entre las que se encuentran “crear una nueva biblioteca” como se muestra en la Figura 17.

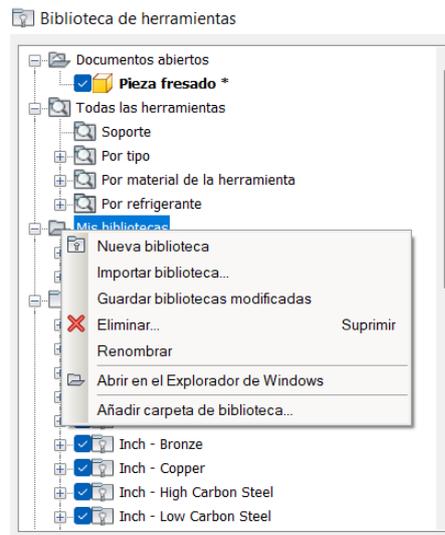


Figura 17. Creación de una nueva biblioteca de herramientas dentro de Inventor CAM

Haciendo click sobre esta opción se creará una nueva biblioteca de herramientas en la cual se podrán introducir las herramientas que se quieran guardar en ella. Para ello, en la parte inferior de la biblioteca de herramientas aparecen las siguientes opciones donde podemos crear nuevas herramientas, portaherramientas o generar una nueva biblioteca de herramientas como se muestra en la Figura 18:



Figura 18. Opciones de generación de herramientas

Una vez se hace click en “nueva herramienta” aparecerá la ventana mostrada en la Figura 19, donde se deben introducir los datos de la herramienta que se quiera crear.

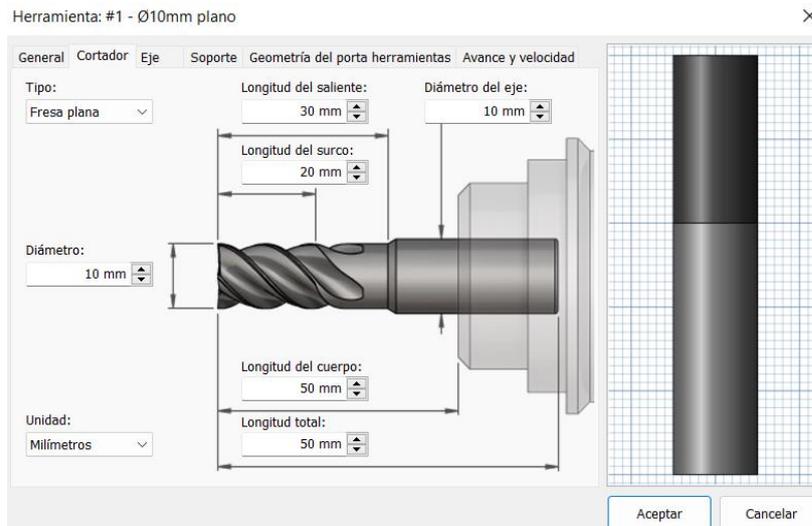


Figura 19. Pestaña “cortador” en la creación de nuevas herramientas

En esta ventana de creación de herramientas se pueden ver distintas pestañas para configurar completamente cada herramienta. En la Figura 19 se muestra la pestaña “cortador” donde se configuran los datos geométricos de la herramienta.

Otra pestaña importante de configurar sería “avance y velocidad” donde se introducirán los datos de velocidades recomendados por el fabricante de la herramienta. En la Figura 20 se indica esta pestaña.

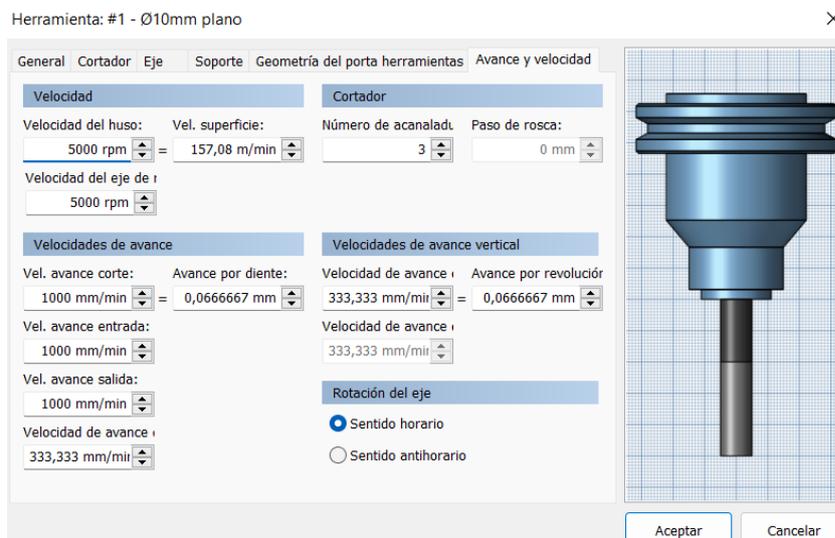


Figura 20. Pestaña “Avance y velocidad” en la creación de nuevas herramientas

Una vez creadas todas las herramientas en la biblioteca personalizada, estas aparecerán en la pantalla como se muestra en la Figura 21, y será posible elegir las durante el proceso de generación de las trayectorias de corte.

Nombre	Número	Díámetro	Radio de esq...	Ángulo	Tipo	Proveedor	ID de prod...	Descripción	Comentario	Velocidad del...	Avance de ...	Desfase de diá...
#1 - Ø10mm plano	1	10 mm			Fresa plana					5000	1000	1
#2 - Ø10R5mm bola	2	10 mm	5 mm		Fresa de bola					5000	1000	2
#3 - Ø20mm cara	3	20 mm	0 mm	0°	Fresado de cara					5000	1000	3
#4 - Ø20mm plano	4	20 mm			Fresa plana					5000	1000	4

Figura 21. Herramientas creadas en una biblioteca personalizada dentro de Inventor CAM

Realizar una biblioteca de herramientas antes de comenzar a crear las trayectorias de mecanizado tiene, por tanto, una gran utilidad para ordenar en un mismo espacio las herramientas que se van a utilizar. Cuando se realizan mecanizados con una gran cantidad de operaciones y herramientas, este paso previo al mecanizado puede ser de mucha ayuda para seleccionar de forma más rápida las herramientas.

4.4.3 Estrategias de mecanizado

Una vez se ha realizado la configuración de la operación y se ha creado la biblioteca de herramientas, el siguiente paso es comenzar a realizar las trayectorias de mecanizado sobre el material en bruto hasta obtener la geometría de la pieza final. Para ello, Inventor dispone de las estrategias mostradas en la Figura 22. Es posible realizar estrategias de fresado en varios ejes, torneado, taladrado o corte por láser, chorro de agua o plasma.

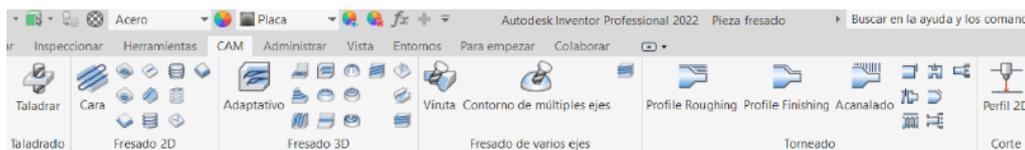


Figura 22. Estrategias de mecanizado en Autodesk Inventor CAM

La Figura 23 muestra el cuadro de diálogo de una operación, planeado en este caso, pero que sirve para ver las pestañas disponibles dentro de cada operación, ya que son las mismas. Dentro de cada pestaña hay parámetros que son distintos de una operación a otra, pero al configurar cualquier operación hay que revisar siempre estas cinco pestañas.

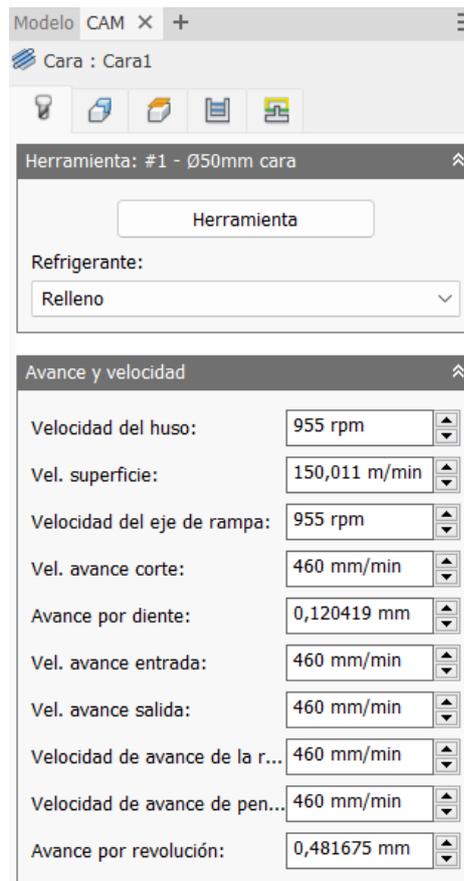


Figura 23. Pestaña “Herramienta” en estrategia de mecanizado

Dentro de la pestaña “herramientas”, hay que seleccionar la herramienta destinada a la operación seleccionada, con los parámetros dados por el fabricante de la herramienta.

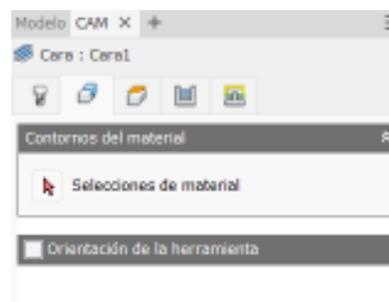


Figura 24. Pestaña “geometría” en estrategia de mecanizado

Dentro de la pestaña “geometría”, se selecciona la geometría necesaria de nuestra pieza para definir correctamente la operación que se va realizar.

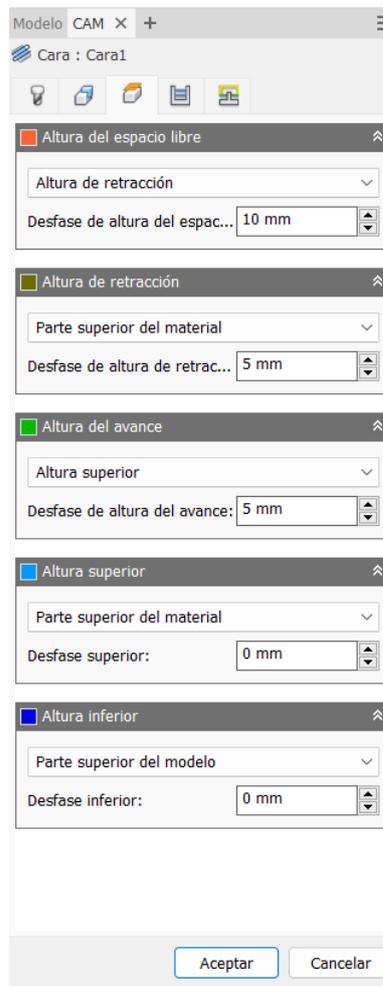


Figura 25. Pestaña “alturas” en estrategia de mecanizado

Dentro de la pestaña “alturas”, se configuran los valores de las distintas alturas del mecanizado. La altura superior, que es la altura que define la parte superior del corte. La altura inferior, que define la profundidad del mecanizado final. La altura de avance, a la que se dirige la herramienta antes de cambiar la velocidad de avance. La altura de retracción, a la que se desplaza la herramienta antes de la siguiente pasada de corte y la altura de espacio libre que es la primera altura a la que se desplaza la herramienta antes de iniciar la ruta de la herramienta.

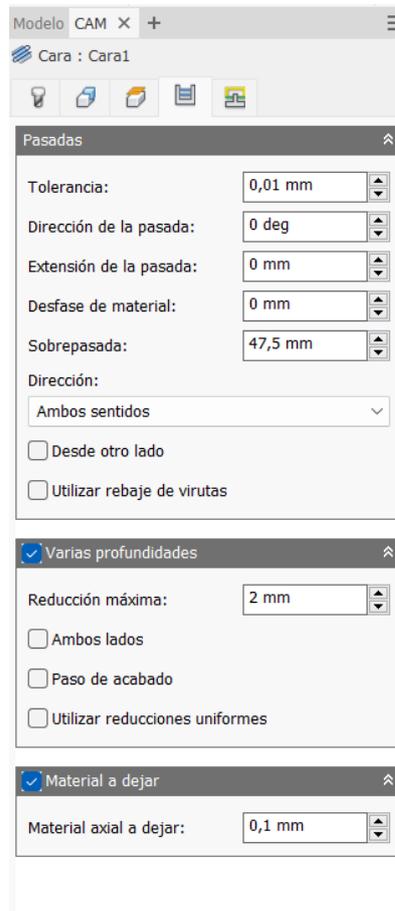


Figura 26. Pestaña “pasadas” en estrategia de mecanizado

Dentro de la pestaña “pasadas”, se configuran los parámetros de la operación, tales como material a dejar para operaciones de acabado posteriores, si se va a realizar la operación en varias pasadas de profundidad, sobrepasada o pasada lateral, dirección de la pasada etc.

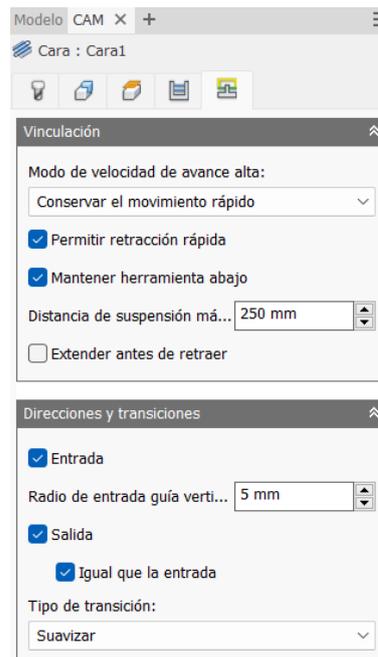


Figura 27. Pestaña “vinculación” en estrategia de mecanizado

En la pestaña “vinculación”, mostrada en la Figura 27, se establecen los movimientos de la herramienta entre cortes: entradas/salidas de la herramienta, forma de retracción de la herramienta, etc.

En el siguiente capítulo, donde se procederá a realizar el mecanizado de un molde de acero para fundición en coquilla, se verán algunas de estas estrategias, en concreto estrategias de fresado 3D.

4.4.4 Simulación y verificación del mecanizado

Una vez realizadas las estrategias de mecanizado adecuadas para obtener la pieza final, se realiza la simulación del mecanizado con el objetivo de optimizar el proceso al máximo, poder ver el resultado final de la pieza de forma virtual antes de mecanizarla físicamente, calcular el tiempo de mecanizado tratando de reducirlo si fuera posible y comprobar posibles colisiones de las herramientas, el portaherramientas o las partes móviles de la máquina que puedan destruir el resultado final de nuestra pieza.

Para acceder a la simulación del mecanizado, en el panel trayectoria se hace click en el icono simular  que podemos ver en la Figura 28.



Figura 28. Selección de la opción simular en la cinta de opciones de Autodesk Inventor

Una vez seleccionado, se abre la siguiente ventana de simulación:

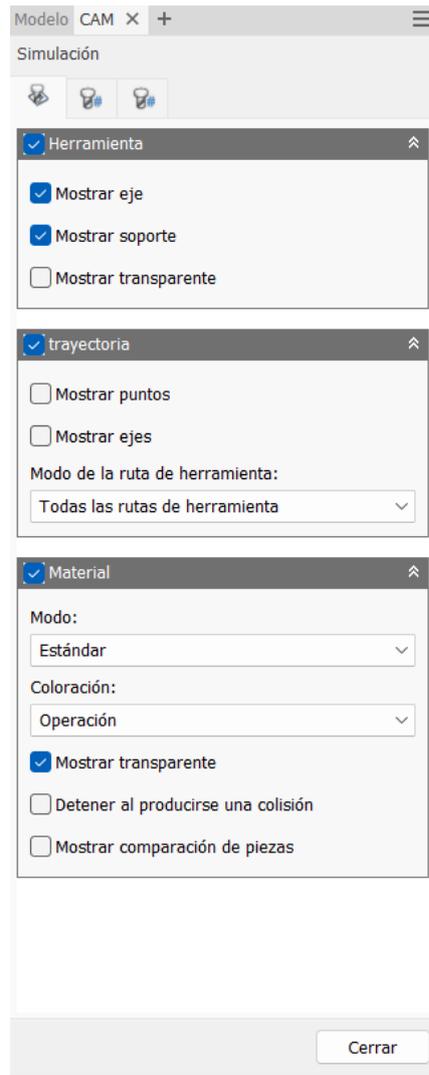


Figura 29. Pestaña “mostrar” dentro de la ventana simulación

Dentro de la pestaña “mostrar” se puede activar o desactivar la visibilidad de la herramienta y sus elementos, mostrarla transparente, activar o desactivar la visibilidad de las trayectorias y del material de partida. También se puede establecer que la simulación pare en caso de colisión.

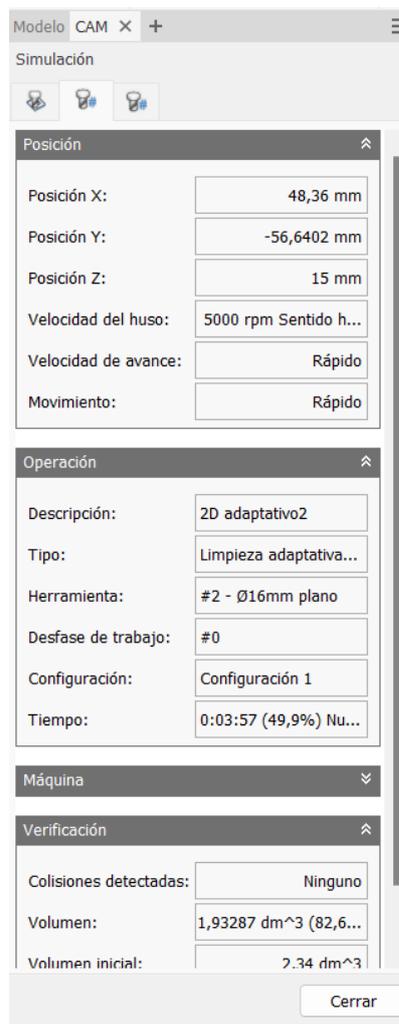


Figura 30. Pestaña “información” dentro de la ventana simulación

La Figura 30 muestra la pestaña información, donde se pueden ver las posiciones X, Y, y Z de la ruta de la herramienta en cada punto de la trayectoria, datos de la operación, de la máquina y, de especial utilidad, el área “verificación” ya que permite conocer si se ha producido alguna colisión en la simulación y en la casilla “distancia” se permite, al desplazar el cursor del ratón sobre el material, conocer la distancia entre el material, después de la simulación de la operación, y el modelo que se quiere obtener, permitiendo saber si hay material sobrante después de realizar la operación o se eliminó todo por completo.

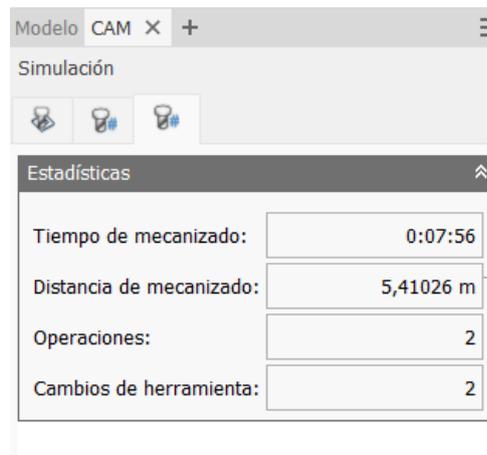


Figura 31. Pestaña “estadísticas” dentro de la ventana simulación

Por último, en la pestaña estadísticas aparece el tiempo total de mecanizado y el número de operaciones y cambios de herramienta empleados en el mecanizado. Lo podemos observar en la Figura 31.

En la simulación, la ventana gráfica se muestra como aparece en la Figura 32:

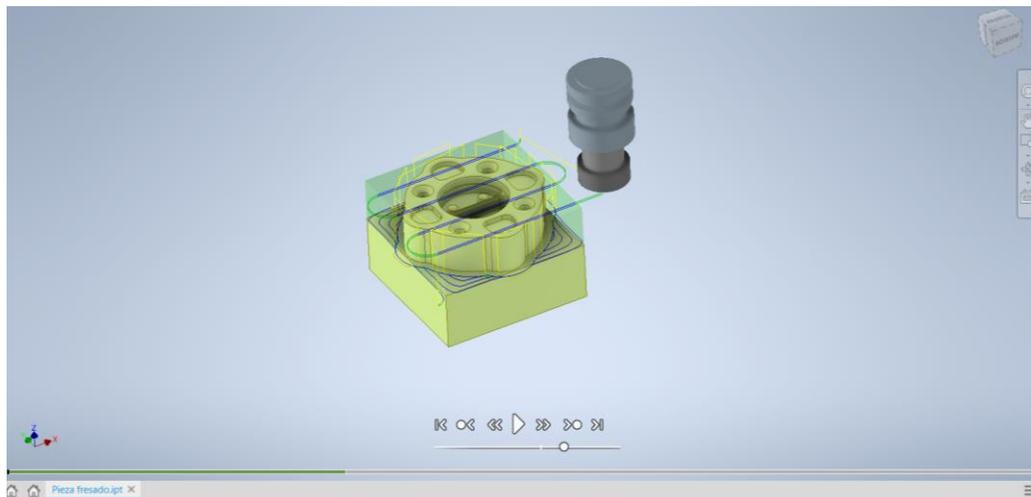


Figura 32. Aspecto ventana gráfica en simulación

En ella se observa la pieza a mecanizar, el material o tocho de partida, la herramienta y las trayectorias de mecanizado.

Además, se muestra el reproductor de simulación, con diferentes botones para controlar la simulación: el botón play para reproducir la simulación o los botones de los extremos para saltar al final o al principio de la simulación.

Moviendo el control circular sobre la barra, se controla la velocidad de reproducción de la simulación.



Figura 33. Reproductor de simulación

Y la línea de tiempo del reproductor de simulación, la cual muestra las operaciones que se reproducirán en la simulación. Si se selecciona el nodo de operaciones del archivo, todas las operaciones serán mostradas en la línea de tiempo. La operación que se está reproduciendo se muestra en verde en la barra, mientras que el resto de operaciones aparecen en distintos tonos grises.



Figura 25. Línea de tiempo del reproductor de simulación

Si se mantiene el cursor del ratón sobre una operación, aparece un cuadro emergente que nos da información sobre el tiempo de mecanizado, herramienta empleada o tipo de estrategia utilizada en esa operación.



Figura 34. Línea de tiempo del reproductor de simulación

Si al reproducir la simulación se producen colisiones entre distintos elementos del mecanizado como, por ejemplo, el portaherramientas y la pieza, aparecerían líneas rojas en la línea de tiempo del reproductor de simulación, indicando el tipo de colisión, el momento en qué se produce y permitiendo visualizar la colisión.

En la Figura 35 se puede ver como aparecería una línea de tiempo con colisiones.

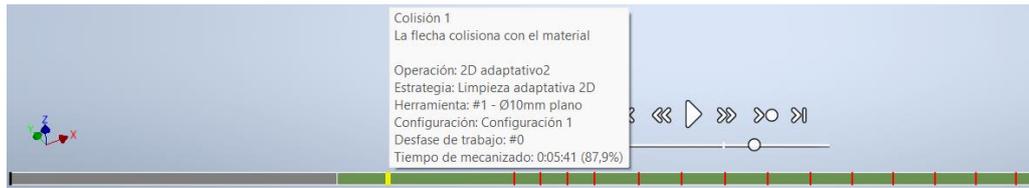


Figura 35. Colisiones mostradas en la línea de tiempo del reproductor de simulación

4.4.5 Postprocesado.

El último paso consiste en generar el código requerido por la máquina CNC.

Para ello, en el panel trayectoria, se debe seleccionar el icono “ejecutar procesamiento posterior” . Se abre el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 36.

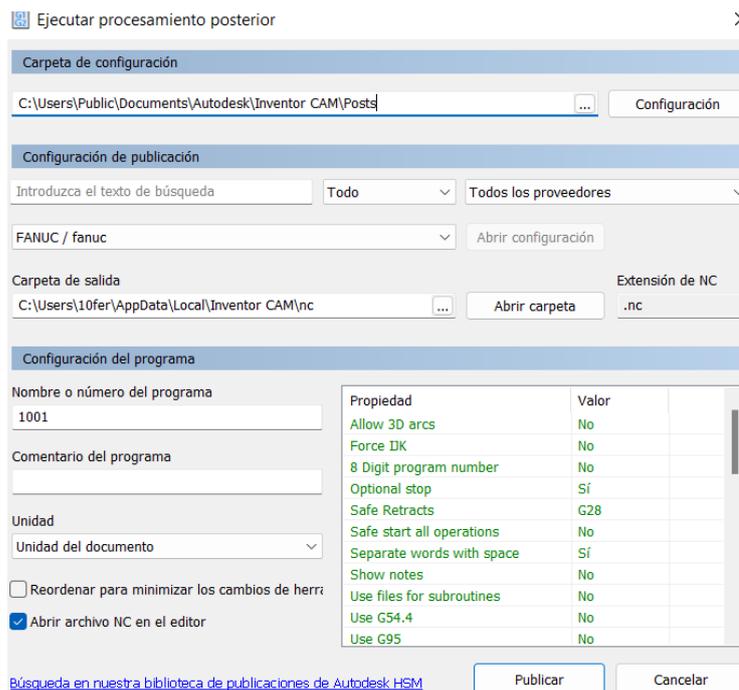


Figura 36. Cuadro de diálogo “ejecutar procesamiento posterior”

En esta ventana se selecciona la configuración de postprocesador que se va a utilizar, se elige la carpeta de salida donde se guardará el código y se escribe el nombre o número del programa. Una vez definido todo lo anterior se hace click en “publicar” y después en “guardar”. El código se abrirá en un editor donde se puede modificar si fuera necesario antes de enviarlo a la máquina CNC.

5. Mecanizado de un molde de acero para fundición en coquilla

Conocido el entorno de trabajo de Inventor CAM y como sería un proceso general de mecanizado, se va a realizar el mecanizado de un molde de acero mediante este software para comprobar si tiene la capacidad necesaria para realizar este tipo de trabajo, utilizando estrategias de fresado 3D, sin tener que recurrir a otros softwares más potentes y más utilizados en la industria.

5.1 Material del tocho de partida

En primer lugar, debemos conocer cual es el material del molde que vamos a mecanizar, pues es importante a la hora de seleccionar las herramientas de corte necesarias y establecer los parámetros adecuados en cada operación.

El material del tocho de partida es un acero AISI H13, material muy utilizado para la fabricación de moldes de fundición de aluminio. Presenta las siguientes características:

- Alta templabilidad y tenacidad.
- Gran resistencia al agrietamiento térmico y la abrasión.
- Resistencia moderada a la descarburación.
- Se puede utilizar una resistencia moderada al desgaste y un proceso de cementación o nitruración para aumentar la dureza de su superficie, pero con una ligera reducción de la resistencia al agrietamiento térmico.
- La deformación es pequeña después del tratamiento térmico.
- Buena maquinabilidad

Estos aceros están diseñados para resistir las condiciones de alta presión, calor y abrasión. El acero para herramientas H13 se usa más que cualquier otro acero para herramientas gracias a su buena combinación de alta tenacidad y resistencia a la fatiga. *(Todo Lo Que Necesita Saber Sobre El Acero Para Herramientas H13 / DEK, s.f.) (Acero H13 | AISI H13 | 1,2344 | SKD61, s.f.)*



Composición Química acero H13

- Carbono 0.40 %
- Silicio 1.0 %
- Magnesio 0.35 %
- Cromo 5.25 %
- Molibdeno 1.30 %
- Wolframio 1.20 %
- Vanadio 0.30 %

El acero H13 tiene buenas propiedades mecánicas y se usa ampliamente en la industria. Se va a utilizar este tipo de acero ya que satisface las necesidades de los requisitos de calidad del molde.

La vida útil del molde fabricado en este material aumentaría si la superficie del mismo se ve sometida a nitruración o cianuración.

Propiedades Acero H13	Valores
Máxima Resistencia a la tracción (@20°C/68°F, varía con el tratamiento térmico)	1200-1590 MPa
Resistencia a la tracción, rendimiento (@20°C/68°F, varía con el tratamiento térmico)	1000-1380 MPa
Reducción del área (@20°C/68°F)	50.00%
Módulo de elasticidad (@20°C/68°F)	215 GPa
Coefficiente de Poisson	0.27-0.30
Densidad (@20°C/68°F)	7.80 g/cm ³
Conductividad térmica	25 W / m ° C
Punto de fusión	1427°C

(Qué Es El Acero H13 / 1.2344 / SKD61 • Composición Química • Precio, s.f.)

Aplicaciones del acero H13:

- Dados de extrusión de Aluminio, dados cabeceadores, de forja caliente y para recalcar en caliente.
- Moldes de fundición de Aluminio y Zinc
- Moldes de Inyección de Plástico
- Punzones para Perforar en Caliente
- Insertos de Dados Cabeceadores

Se va a partir de un tocho de material con unas dimensiones de 480 x 260 x 178 mm. Tiene 3 mm de material adicional en la parte superior en comparación al molde final y 0 mm en la parte inferior y los laterales.

5.2 Molde a mecanizar

El modelo 3D del molde a mecanizar en inventor Cam ha sido proporcionado en formato .Step. Este formato guarda la geometría 3D de las piezas, y es un archivo que podemos abrir con Inventor. El molde consta de dos partes (coquilla fija y móvil) que deben encajar perfectamente entre sí para que el proceso de colada se produzca de manera adecuada y se obtengan piezas con las dimensiones correctas y buena calidad superficial.

A continuación, en la Figura 37 y la Figura 38 se muestra como deben quedar las dos partes del molde después de mecanizarlo:

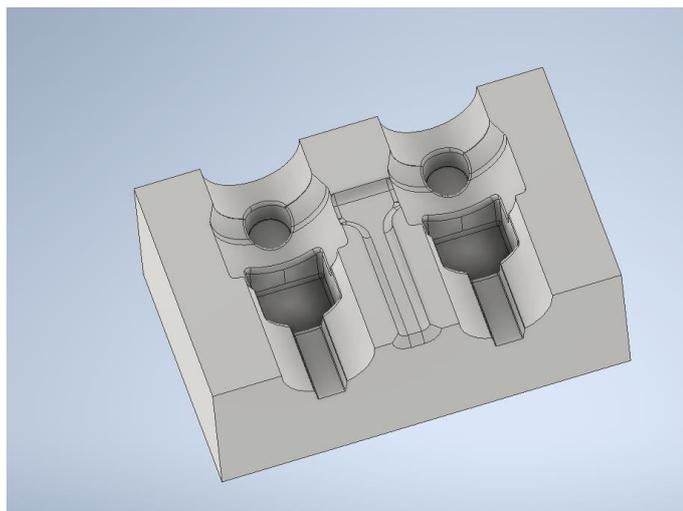


Figura 37: Coquilla fija

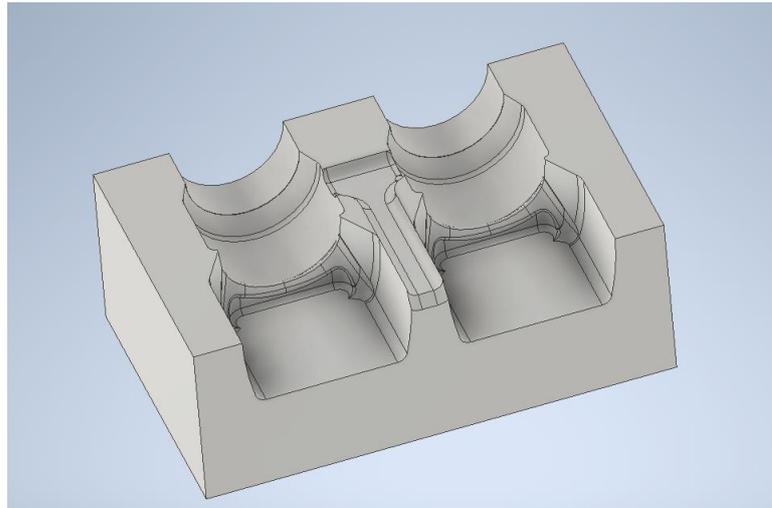


Figura 38: Coquilla móvil

5.3 Mecanizado con inventor paso a paso

Se va a mecanizar en Inventor CAM el molde descrito para poner en práctica como es un proceso de mecanizado en este software y comprobar la capacidad que tiene el mismo para este tipo de trabajos.

Se va a mostrar el mecanizado de la coquilla fija. Las operaciones, herramientas utilizadas y parámetros de mecanizado serán los mismos para la coquilla fija y para la móvil.

El primer paso antes de comenzar a crear las trayectorias de las estrategias de mecanizado será crear la configuración de nuestro mecanizado y seleccionar las herramientas de corte adecuadas para cada operación con sus correspondientes medidas geométricas y parámetros de corte recomendados por el fabricante de las mismas. Una vez que se hayan seleccionado las herramientas de corte, se va a crear una librería donde almacenar las herramientas seleccionadas de tal forma que se necesite elegir la herramienta en cada estrategia de mecanizado resulte sencillo encontrarla. Las herramientas han sido seleccionadas con la ayuda del software Sandvik Toolguide. Al final del presente trabajo, en el apartado Anexos, se muestran las herramientas seleccionadas con sus características más importantes.

Una vez se haya creado la biblioteca de herramientas y la configuración del mecanizado, se comenzarán a generar las trayectorias de corte y , por último, se simularán y verificarán las mismas, para evitar posibles errores en el

mecanizado, y se generará del código CNC que se enviará a la máquina fresadora para realizar el mecanizado de la cavidad del molde.

5.3.1 Abrir archivo .step en Inventor Cam

Antes de nada, se debe abrir el archivo .STEP, con la geometría 3D del molde que ha proporcionado el cliente, en Inventor Cam. STEP es un formato de intercambio estándar que se utiliza para el intercambio de datos entre diferentes programas.

5.3.2 Configuración del mecanizado

Como se ha mencionado, el primer paso y, fundamental, es crear la configuración del mecanizado. Para ello seleccionamos el icono  dentro del panel “trayectoria” en la pestaña CAM. Se abre el siguiente cuadro de diálogo:

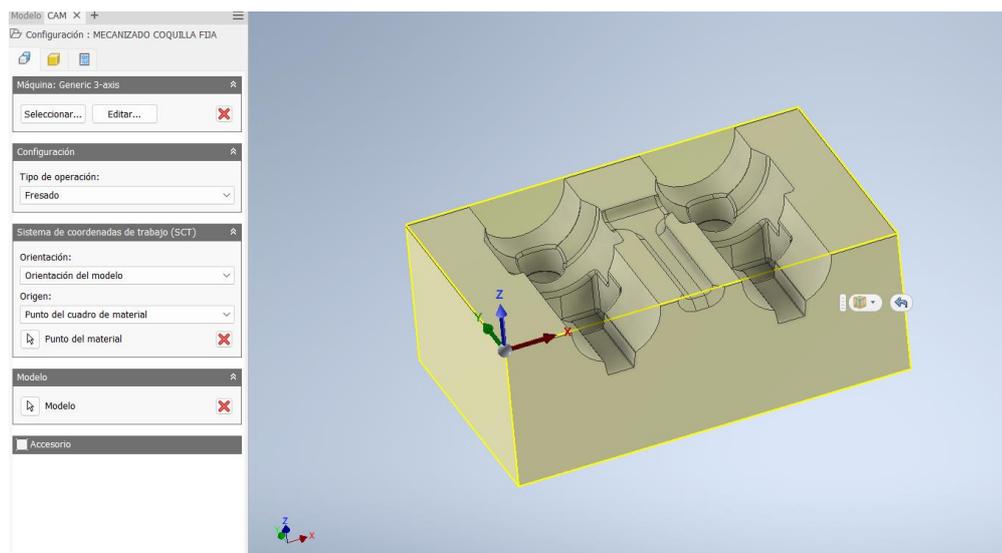


Figura 39: Cuadro de diálogo configuración

En él se pueden observar tres pestañas, en las cuales se debe configurar lo siguiente:

- Tipo de proceso de mecanizado: Fresado.
- Máquina: Universal de 3 ejes.
- SCT (sistema de coordenadas de trabajo): se selecciona el origen del sistema de coordenadas en la parte superior del tocho de partida y en el vértice de abajo a la izquierda como se muestra en la Figura 39.

También se elige la orientación de los ejes de mecanizado. Eje Z hacia arriba y X hacia la derecha.

- En “modelo” hay que seleccionar la pieza final (el molde en este caso).
- Se podría seleccionar en “accesorios” los elementos de fijación del tocho a la mesa. En este caso no se van a seleccionar pues no es relevante en este mecanizado ya que no va a ver problemas de colisión entre la herramienta y estos sistemas de fijación.
- En la pestaña “material” se va a establecer cuales son las dimensiones de nuestro material de partida. Para ello se añade 3 mm de material a la parte superior del modelo para configurar la dimensión real de nuestro tocho de partida.

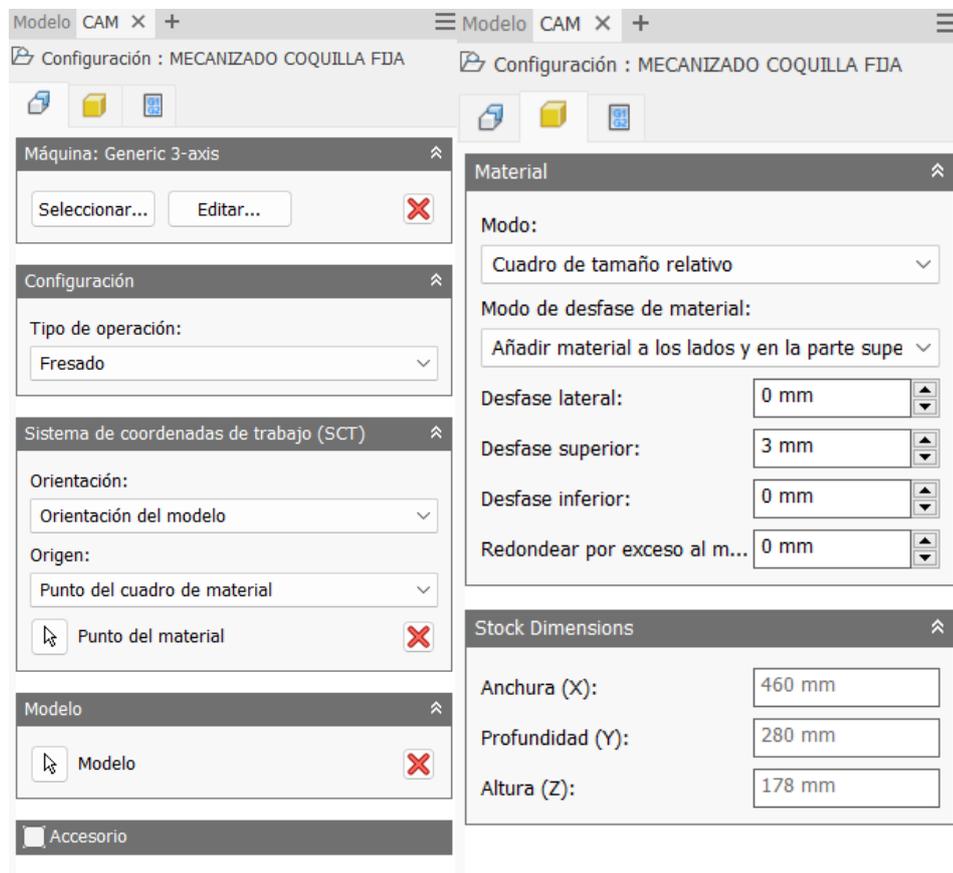


Figura 40: Pestañas “configuración” y “material” en el cuadro de dialogo configuración

5.3.3 Elección de herramientas de corte y creación de una biblioteca de herramientas personalizada

El siguiente paso es seleccionar las herramientas de corte para cada operación. Para ello se ha empleado el software Sandvik Toolguide. En el anexo I del presente trabajo se encuentran las herramientas seleccionadas con sus características geométricas.

Con las herramientas ya elegidas se procede a crear una biblioteca de herramientas en Inventor CAM, lo cual es de mucha utilidad ya que permite guardar las herramientas que han sido seleccionadas para el proceso de mecanizado y de esta forma no habrá que ir creándolas a la vez que se generan las estrategias de mecanizado.

Para crear una biblioteca de herramienta se procede de la siguiente forma. Se hace click en el siguiente icono , el cual abrirá la biblioteca de herramientas de inventor CAM. Una vez allí aparecerá la siguiente ventana, donde en el apartado “mis bibliotecas” se puede crear una biblioteca personalizada para el mecanizado y añadir las herramientas con los datos obtenidos de Sandvik.

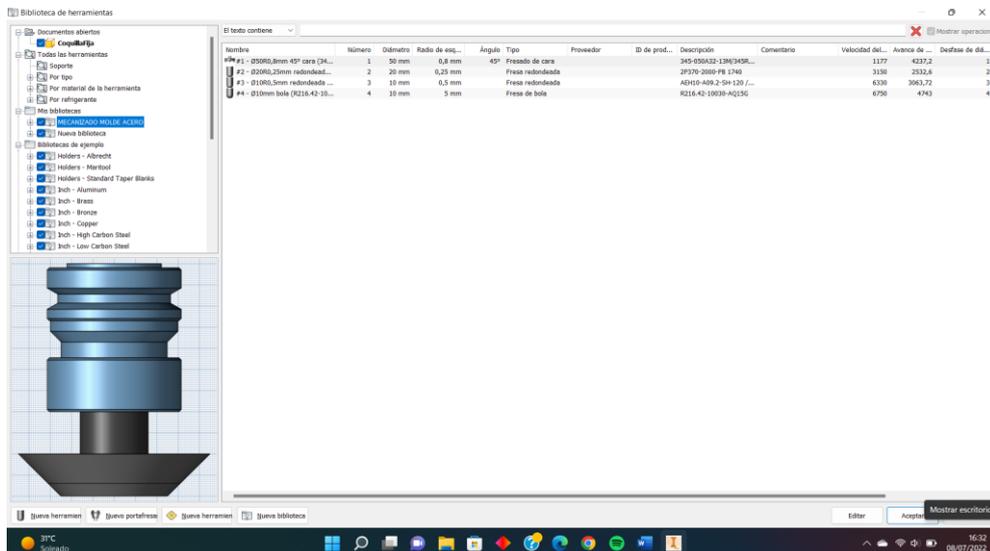


Figura 41 : Biblioteca de herramientas.

Se crean las herramientas elegidas en Sandvik para nuestro mecanizado de la forma que vimos en el capítulo anterior.

Se va a mostrar un ejemplo de cómo crear una herramienta para este mecanizado. Para las demás el procedimiento será el mismo.

Para la operación de planeado se ha creado la herramienta que recomendó Sandvik Toolguide, la cual consta de un portaplaquitas 345-050A32-13M y de una plaquita 345R-1305M-PH 4330 (todos los datos de las herramientas están en el apartado Anexos I al final del presente trabajo).

Se selecciona “nueva herramienta” dentro de la biblioteca de herramientas personalizada y se abrirá la siguiente ventana mostrada en la Figura 42.

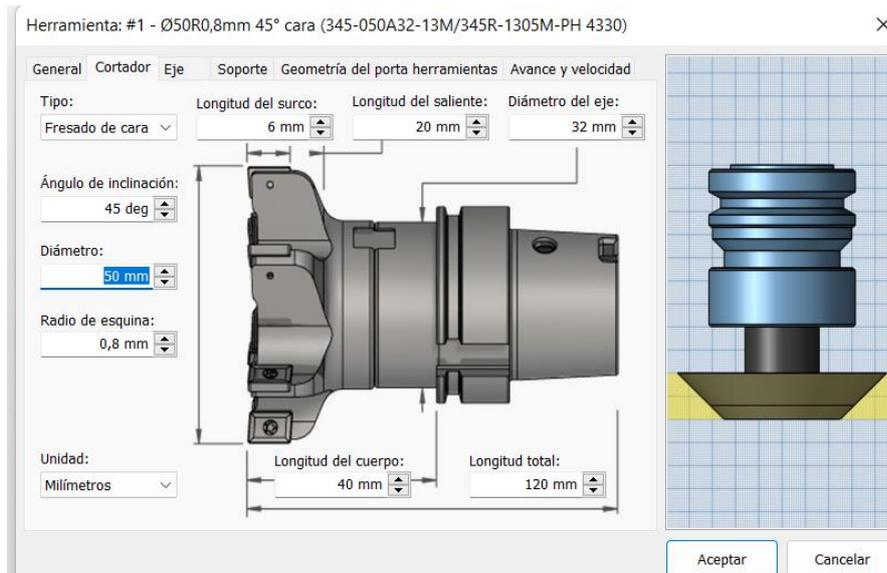


Figura 42: Creación herramienta de planeado. Pestaña “cortador”.

Dentro de ella, hay diversas pestañas para configurar completamente la herramienta que se va a crear. Se han introducido los datos obtenidos en Sandvik en cuanto a la geometría en la pestaña “cortador”:

- $D_c=50$ mm
- $R_e=0.8$ mm
- Angulo inclinacion de 45°
- Longitud total =120 mm
- Diametro del eje= 20 mm
- Longitud del cuerpo =40 mm
- Profundidad de corte = 6 mm

Y también las condiciones de funcionamiento en la pestaña “avance y velocidad”:

- $V_c=185$ m/min
- $F(\text{avance por diente})=0.45$ mm

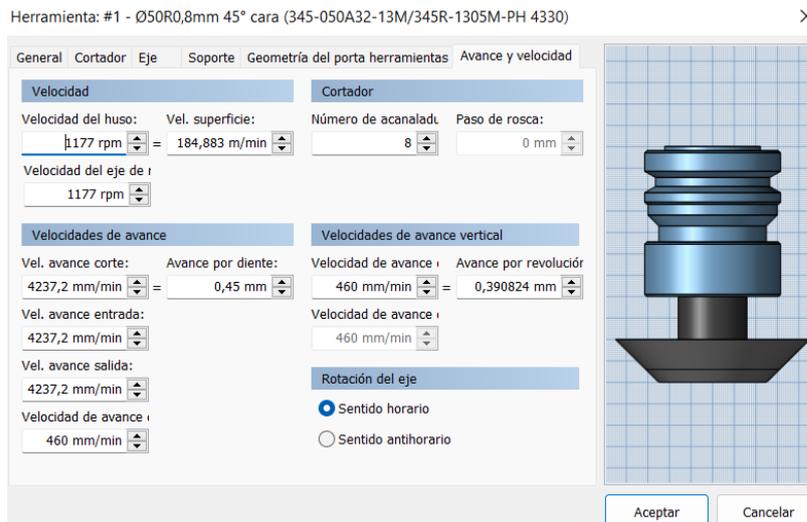


Figura 43: Creación herramienta de planeado. Pestaña “Avance y velocidad”.

El proceso para la creación de las demás herramientas es el mismo por lo que no se va a explicar. Los datos a introducir de las mismas en el programa están en el apartado Anexos I, como se ha comentado.

Una vez creada la biblioteca de herramientas y la configuración, se puede comenzar a crear las trayectorias del mecanizado.

5.3.4 Planeado de las caras de las coquillas que estarán en contacto

Antes de crear las operaciones de mecanizado, se crearán dos carpetas para organizar las operaciones en desbaste y acabado.

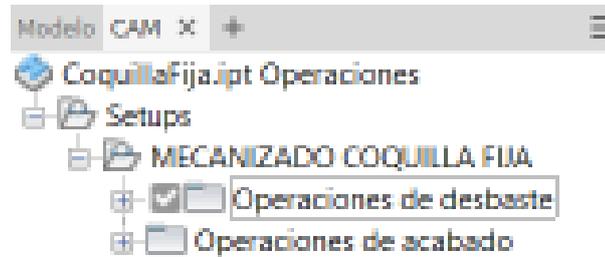


Figura 44: Árbol de operaciones

Así es como quedaría el árbol de operaciones al crear las dos carpetas dónde se guardarán las operaciones de desbaste y acabado. En primer lugar se selecciona la carpeta “operaciones de desbaste” como carpeta por defecto antes de empezar a generar las estrategias de desbaste.

La primera operación será un planeado en la cara superior del material de partida. Como se ha comentado antes, el tocho de partida tiene 3 mm de material adicional en la parte superior tanto de la coquilla fija como de la móvil, por tanto, el primer paso será realizar una operación de planeado para eliminar los 3 mm de material sobrante y de esta forma eliminar cualquier irregularidad buscando la planicidad de las caras de los moldes que entrarán en contacto, algo fundamental para el proceso de fundición en coquilla .



Para ello, se selecciona el icono dentro del panel Fresado 2D. Se abrirá una ventana con diferentes pestañas, donde se van a configurar los parámetros del planeado.

Lo primero es elegir la herramienta que realizará la operación. Como se ha creado previamente una biblioteca con las herramientas que realizarán este mecanizado ahora solo hay que elegir la herramienta creada para cada operación en dicha biblioteca.

En la primera pestaña, se selecciona “Herramienta” para abrir la biblioteca de herramientas. Una vez allí, se selecciona la biblioteca personalizada para el mecanizado y elegimos la herramienta de planeado. En este caso se va a

utilizar el portaplaquitas 345-050A32-13M y la plaquita 345R-1305M-PH 4330. Esta herramienta tiene un diámetro de corte de 50 mm.

La velocidad de corte recomendada por el fabricante es de 185 m/min y un avance por diente de 0.45 mm. Se puede observar la elección de esta herramienta en la Figura 45.

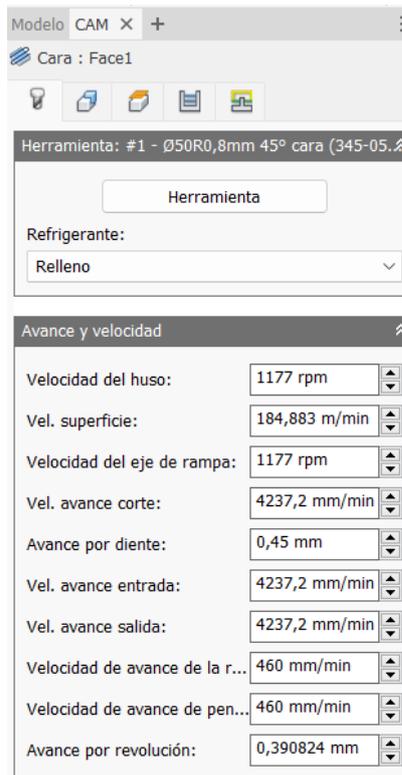


Figura 45: Pestaña “Herramientas” en estrategia planeado

El siguiente paso es seleccionar la geometría para realizar el planeado correctamente. En esta operación se dejará la selección como está por defecto ya que automáticamente el programa selecciona el contorno de la parte superior del tocho de partida.

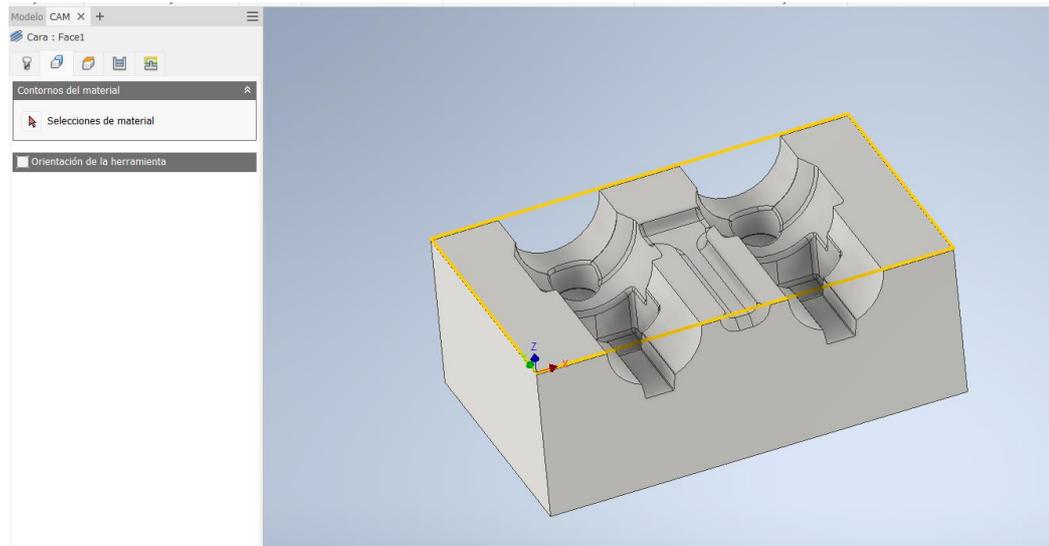


Figura 46: Pestaña “Geometría” en estrategia planeado

Después, en la pestaña “Alturas” se establece una altura de espacio libre de 50 mm respecto a la altura de retracción, la cual a su vez se sitúa a una distancia de 10 mm respecto de la parte superior del material. Esta altura de retracción define la altura a la que se desplazará la herramienta antes de la siguiente pasada de corte y la altura del espacio libre es la primera altura a la que se desplaza la herramienta antes de iniciar su camino al comienzo de la ruta.

Es importante en esta pestaña establecer la altura superior en la parte superior del tocho de partida, pues esta define donde comienza el corte. La altura inferior define la profundidad del mecanizado final por lo que se debe configurar en la parte superior del modelo para realizar este planeado adecuadamente.

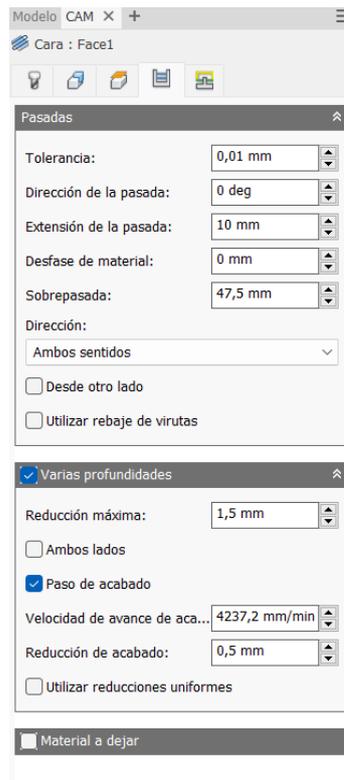


Figura 48: Pestaña “Pasadas” en estrategia planeado

Por último en la pestaña “ Vinculación” se mantienen los valores que vienen por defecto, permitiendo la retracción rápida de la herramienta. Click en aceptar para confirmar todos los parámetros modificados de la operación.

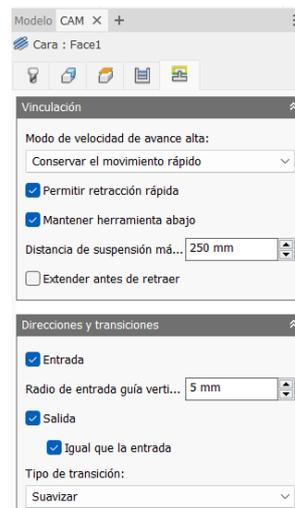


Figura 49: Pestaña “Vinculación” en estrategia planeado

Seleccionando la estrategia creada en el árbol de operaciones se pueden observar las trayectorias que seguirá la herramienta con los parámetros establecidos.

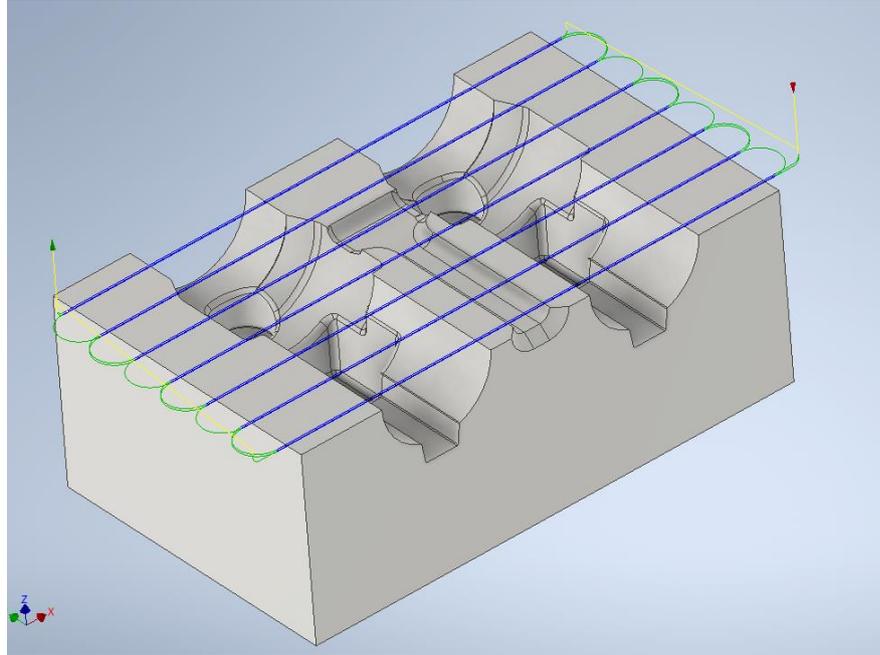


Figura 50: Trayectorias estrategia de planeado

Una vez creada la operación, es necesario simular la misma para visualizar las trayectorias, observar que no se produzcan errores ni colisiones y asegurarse que no quede material sobrante. En la Figura 51 se observa como la herramienta está eliminando material de la cara superior del tocho de partida.

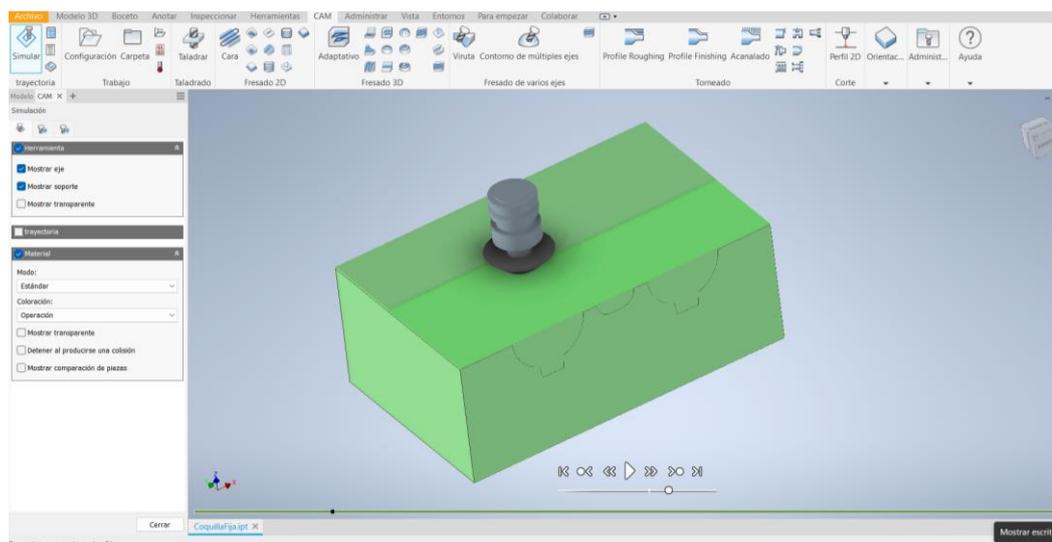


Figura 51: Captura durante la simulación de la estrategia de planeado

Se puede conocer si el material ha sido eliminado por completo en “Verificación” dentro de la pestaña “información”. Además, se puede saber cuánto tiempo dura la operación dentro de la pestaña “Estadísticas”.

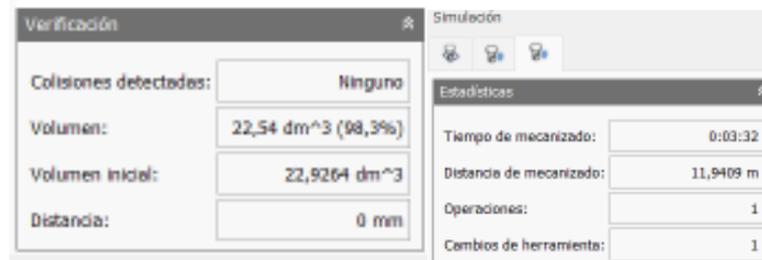


Figura 52: Pestañas verificación y estadísticas dentro de la simulación

5.3.5 Desbaste adaptativo inicial

El desbaste adaptativo permite eliminar grandes cantidades de material con altas velocidades de avance y utilizando grandes profundidades de corte. Se va a emplear esta estrategia para remover la mayor parte del material del molde, de forma rápida y alargando la vida útil de la herramienta.

Se realizará el desbaste en dos operaciones, de manera que se va a utilizar primero una herramienta con un diámetro mayor, para remover la mayor cantidad de material y reducir el tiempo de mecanizado. Después se utilizará una herramienta de diámetro menor para eliminar aquellas zonas a las que no haya podido acceder la herramienta anterior.

En primer lugar, como en la operación anterior, se selecciona la herramienta desde la biblioteca personalizada. Para este desbaste inicial se va a utilizar la fresa enteriza 2P370-2000-PB 1740, con un diámetro de corte de 20 mm y una longitud suficiente para evitar colisiones.

La velocidad de corte recomendada para esta operación es de 198 m/min y un avance por diente de 0.201 mm.

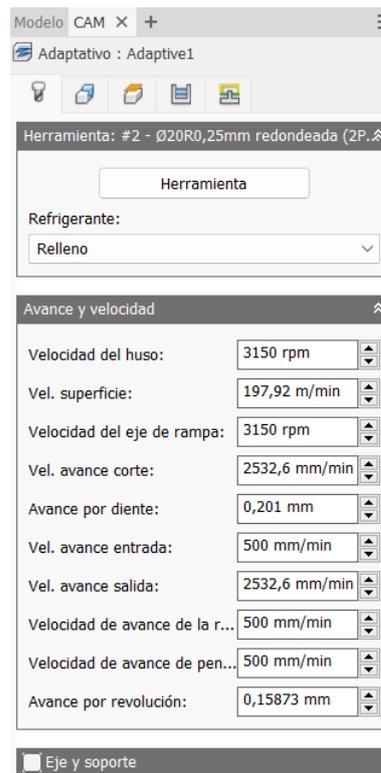


Figura 53: Pestaña “herramienta” en estrategia desbaste adaptativo inicial

Una vez seleccionada la herramienta, en la pestaña “geometría” se define el contorno del material dentro del cual se realizará el desbaste. En esta operación, Inventor detecta automáticamente las zonas a desbastar dentro del contorno seleccionado.

Al haber realizado previamente un planeado, es importante activar la casilla “mecanizado de apoyo” y en origen del material seleccionar “desde operaciones anteriores” de esta forma el mecanizado se calculará desde la operación anterior y se ahorrará tiempo.

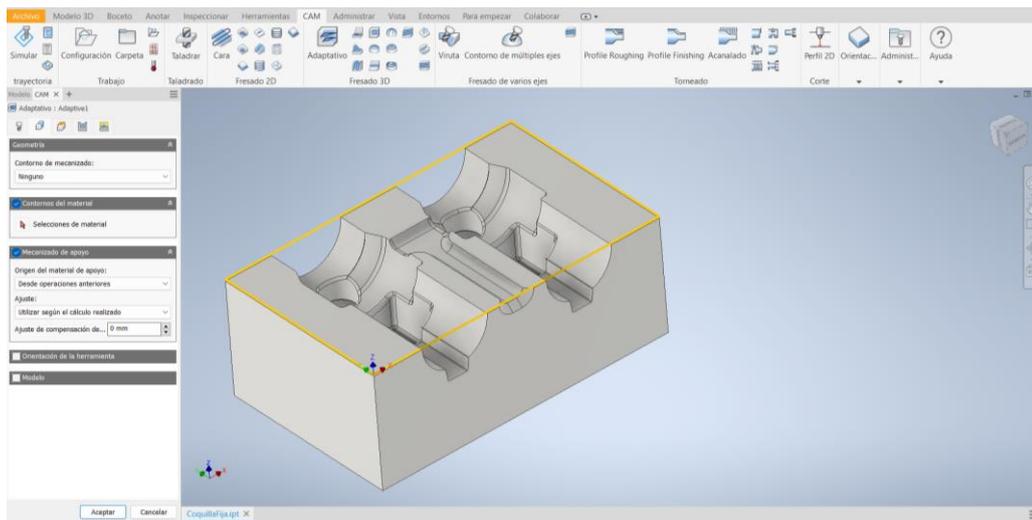


Figura 54: Pestaña “geometría” en estrategia desbaste adaptativo inicial

En la pestaña “Alturas” se definen las mismas distancias que en la operación anterior y hay que asegurarse que la altura superior esté en la parte superior del material de partida y la inferior en la parte inferior del molde final, para que se desbaste toda la cavidad del molde.

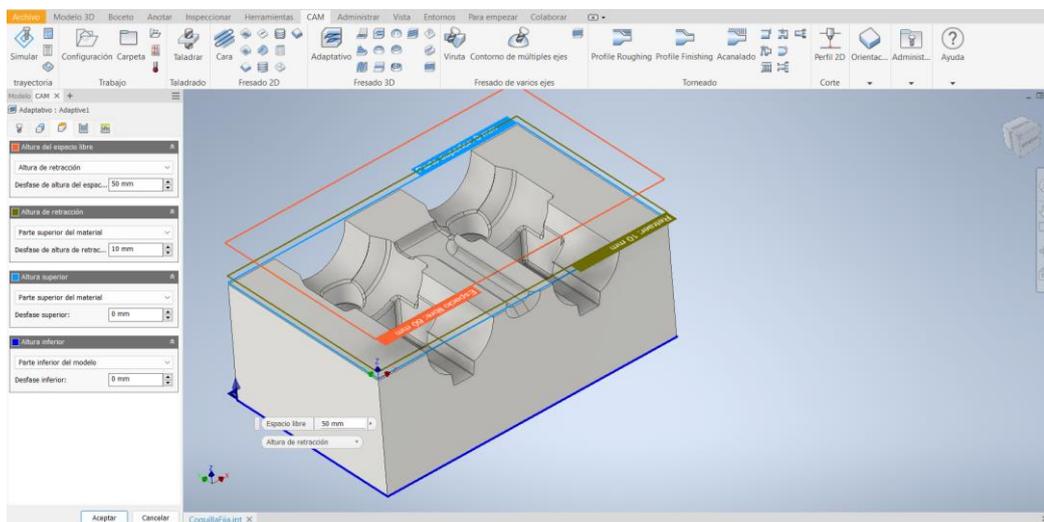


Figura 55: Pestaña “Alturas” en estrategia desbaste adaptativo inicial

En la pestaña “pasadas” se establece una carga óptima del 15% del diámetro de corte, es decir 3 mm y se activa la casilla “mecanizar cavidades”. En este desbaste se va a utilizar una reducción de desbaste máxima un poco mayor al diámetro de corte de la herramienta, es decir de 30 mm y una reducción fina de 3 mm.

Por último, al ser una operación de desbaste, se va a activar la casilla “material a dejar”. Se dejará un material sobrante de 0.5 mm tanto axial como radial para operaciones de acabado posteriores y se activará la casilla de “mecanizado suavizado” para obtener un código más ligero. También se ordenará el mecanizado por área.

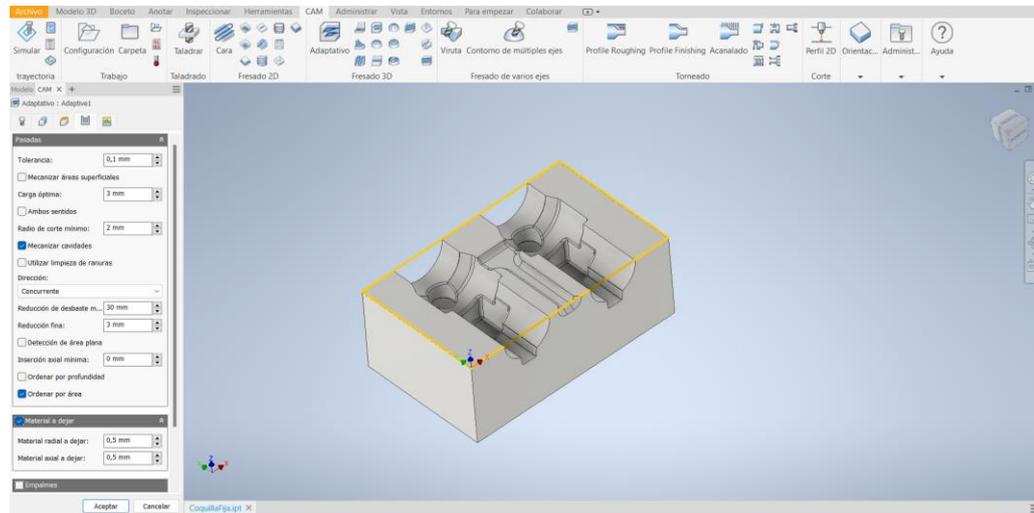


Figura 56: Pestaña “pasadas” en estrategia desbaste adaptativo inicial

Para terminar la configuración de esta estrategia de acabado, en la pestaña “vinculación” se elige retracción mínima para ahorrar tiempo de mecanizado ya que no hay riesgo de colisiones al retraer la herramienta. En tipo de rampa, se selecciona “hélice”.

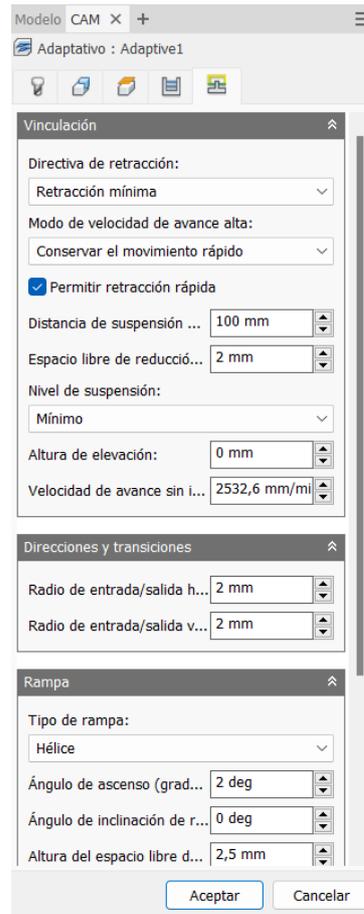


Figura 57: Pestaña “vinculación” en estrategia desbaste adaptativo inicial

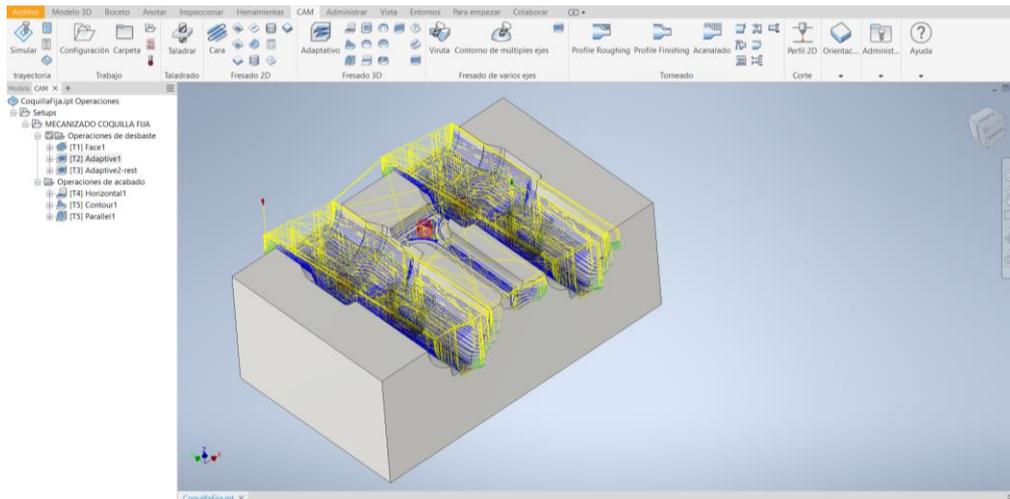


Figura 58: Trayectorias seguidas por la herramienta en desbaste adaptativo inicial.

En la Figura 58, se pueden ver las trayectorias que sigue la fresa en esta estrategia de desbaste.

Finalmente, se simula la operación para asegurarse que no se producen errores. La Figura 59 muestra como queda el tocho de partida tras las dos primeras operaciones de planeado y desbaste inicial.

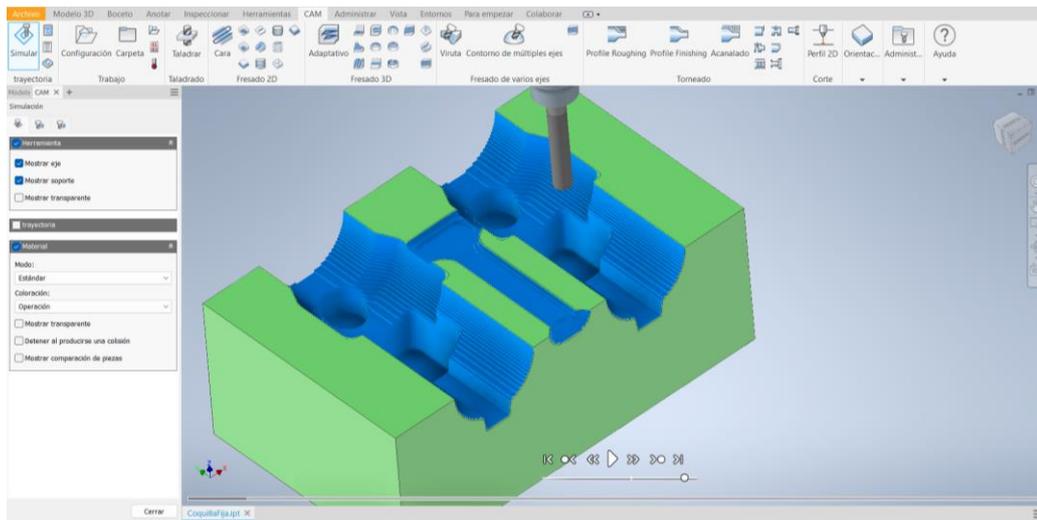


Figura 59: Simulación final tras operaciones de planeado y desbaste inicial.

Se observa que, al realizar este primer desbaste, quedan escalones en la pieza debido a que esta operación se ha realizado para eliminar gran parte del material de forma rápida utilizando grandes profundidades de corte.

En la pestaña estadísticas se puede conocer que tiempo es empleado en realizar la operación de desbaste inicial. Esta operación requiere un tiempo de mecanizado de 1 hora y 46 minutos.

5.3.6 Desbaste adaptativo para eliminar el material sobrante

Para crear esta operación se va a duplicar la anterior, ya que ambas son desbastes adaptativos y muchos de los parámetros de esta operación coinciden con los de la anterior. Para ello, se hace click derecho sobre la operación anterior y se selecciona “duplicar”.

Ahora se va a utilizar una herramienta más pequeña, de diámetro de corte 10 mm para eliminar el material sobrante en aquellos lugares donde la herramienta anterior no pudo acceder. Se trata de una fresa 316-10SL442-10005P 1730 con adaptador AEH10-A09.2-SH-120. De nuevo, a la hora de seleccionar la herramienta hay que asegurarse de que tenga la longitud suficiente para que no se produzcan colisiones entre la herramienta y la pieza.

La velocidad de corte recomendada es de 199 m/min y el avance por diente de 0.121 mm.

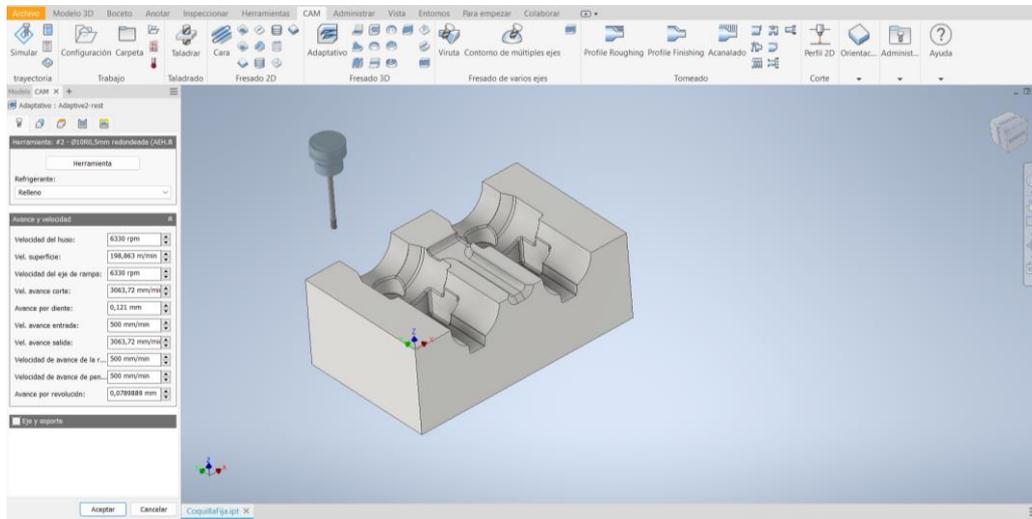


Figura 60: Pestaña “herramienta” en estrategia desbaste adaptativo restante

Una vez seleccionada la herramienta, se va a configurar la pestaña geometría. Al ser ésta una operación donde se van a desbastar aquellas zonas a las que no pudo acceder la herramienta anterior es importante activar la casilla de “Mecanizado de apoyo” y seleccionar el origen del material “desde operaciones anteriores”. De esta forma, el mecanizado eliminará el material sobrante desde la ultima operación.

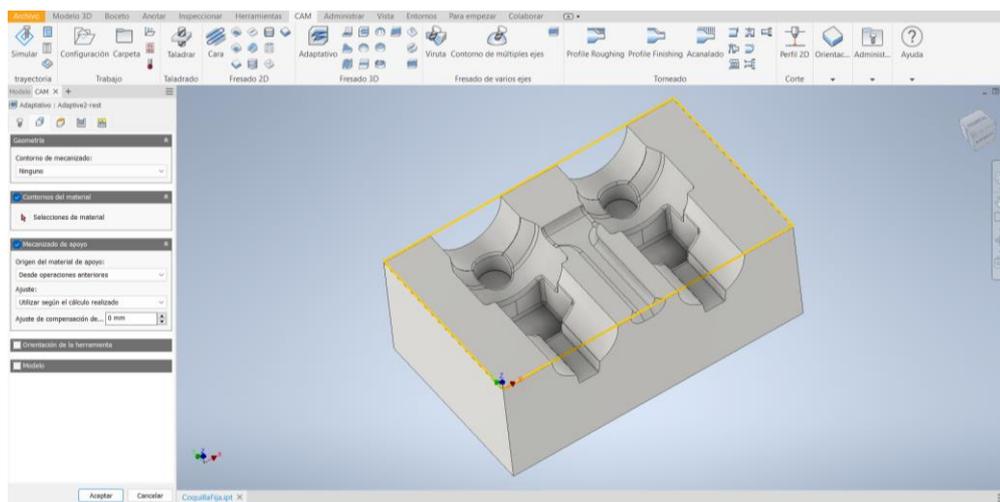


Figura 61: Pestaña “geometría” en estrategia desbaste adaptativo restante

En la pestaña “alturas” se dejan los valores por defecto, ya que al haber duplicado la operación anterior son las mismas que en el primer desbaste adaptativo.

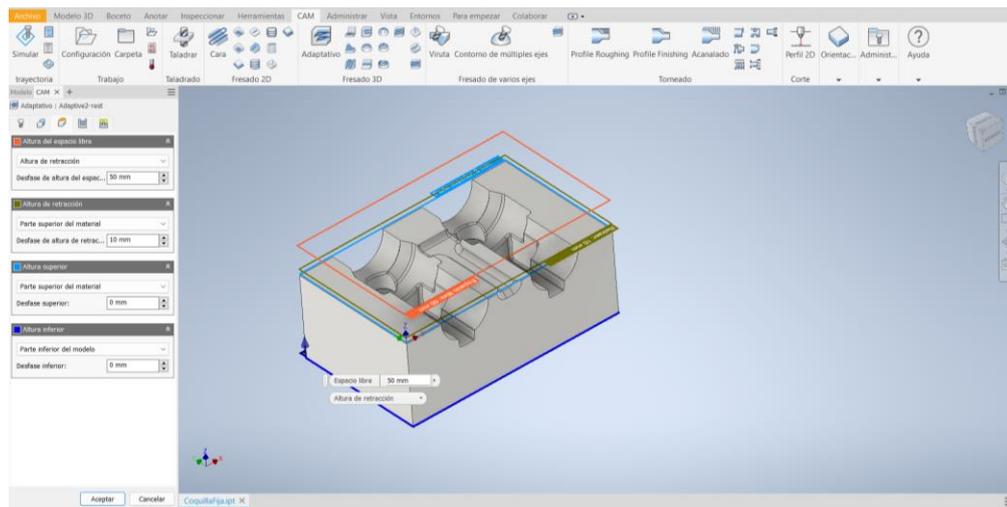


Figura 62: Pestaña “alturas” en estrategia desbaste adaptativo restante

En la pestaña “Pasadas” se configura una carga óptima de 1.5 mm, una reducción de desbaste máxima de 10 mm y se dejará un material sobrante para operaciones de acabado posteriores de 0.5 mm tanto axial como radial.

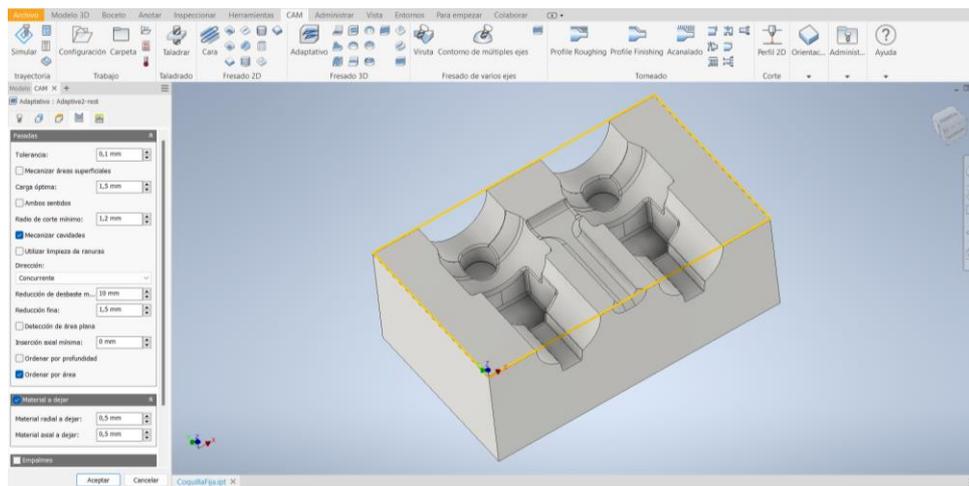


Figura 63: Pestaña “pasadas” en estrategia desbaste adaptativo restante

Tampoco se va a realizar ningún cambio en la pestaña “vinculación”. Se dejarán los parámetros establecidos en la operación anterior.

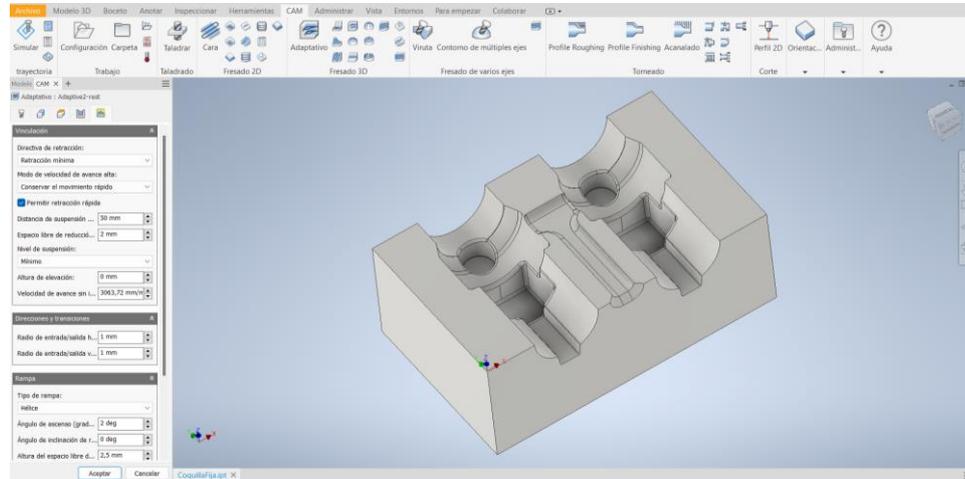


Figura 64: Pestaña “vinculación” en estrategia desbaste adaptativo restante

Por último, en la Figura 65 se pueden ver las trayectorias seguidas por la herramienta en este segundo desbaste.

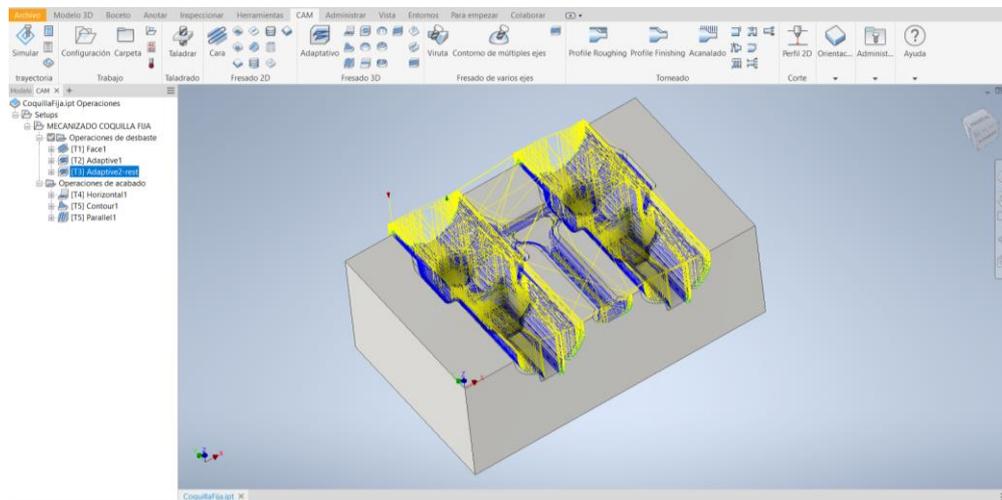


Figura 65: Trayectorias estrategia desbaste adaptativo restante

En la Figura 66 se observa la simulación del molde tras realizar todas las operaciones de desbaste.

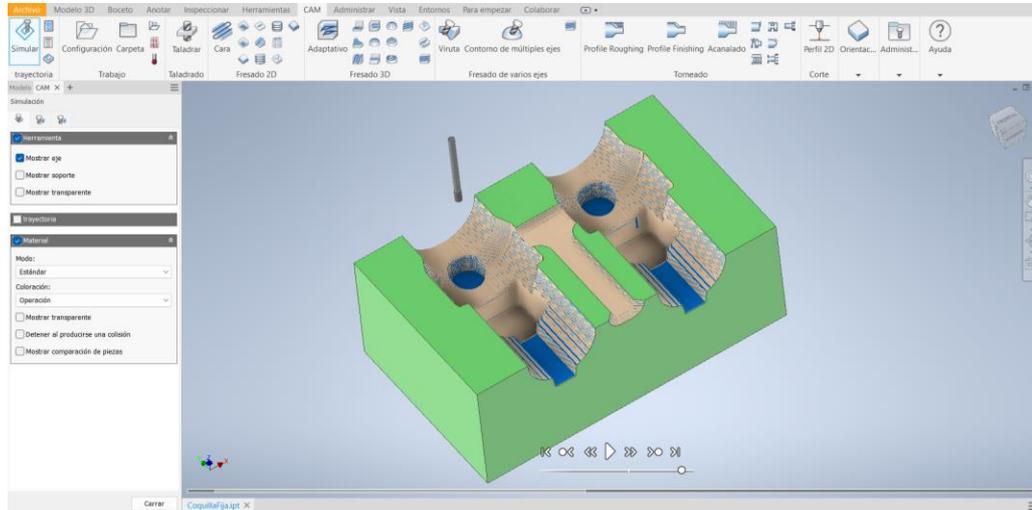


Figura 66: Captura tras simulación de las operaciones de desbaste del molde.

Se puede apreciar, en color azul, como esta herramienta, de diámetro más pequeño, ha mecanizado las zonas donde la herramienta anterior no pudo acceder.

El tiempo de mecanizado empleado para realizar esta operación es de 2 horas y 22 minutos.

5.3.7 Operaciones de acabado. Horizontal, contorno y paralelo

Después de eliminar la mayor parte de material del molde mediante estrategias de desbaste adaptativo se comienza a realizar el acabado del molde. Para ello se van a emplear tres operaciones de acabado: Horizontal, contorno y paralelo.

En primer lugar se realizará la estrategia “Horizontal” para el acabado de aquellas áreas que son perpendiculares al eje de la herramienta. Inventor detecta automáticamente éstas áreas.

Después se dividirá el acabado de las paredes de la cavidad del molde en dos operaciones. Se utilizará “contorno” para las superficies más inclinadas, con un ángulo comprendido entre 30° y 90° y “paralelo” para aquellas con ángulos de 0° a 35° . Esto se hará así para intentar ahorrar tiempo de mecanizado y poder mostrar más estrategias de mecanizado para el acabado.

En primer lugar se va a realizar la operación de acabado “horizontal”.

Se empleará la misma herramienta utilizada en la operación anterior de desbaste adaptativo, la cual es válida para realizar esta operación de acabado horizontal y permite ahorrar tiempo de mecanizado pues se evita tener que cambiar de herramienta.

La velocidad de corte recomendada por el fabricante para esta operación es de 183 m/min y un avance por diente de 0.046 mm.

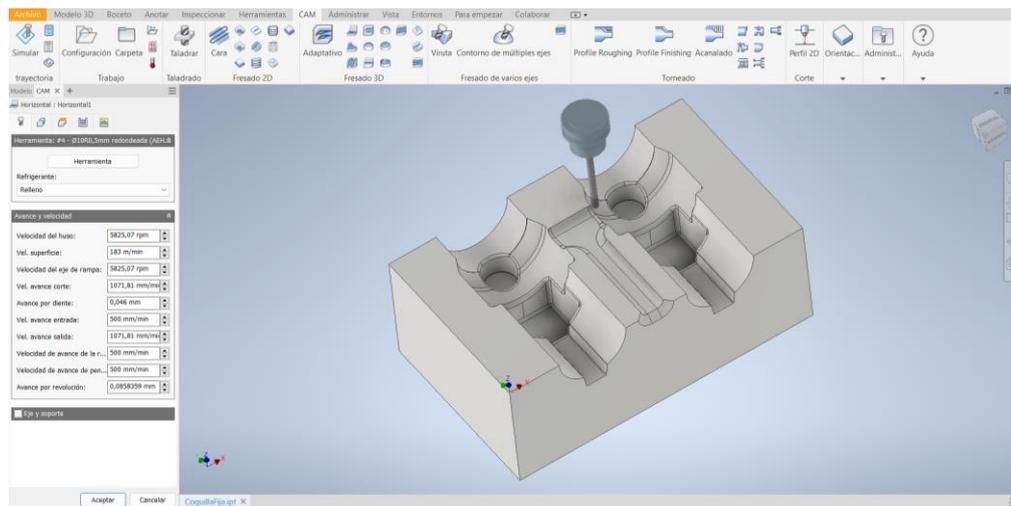


Figura 67: Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado horizontal

En la pestaña “geometría”, mostrada en la Figura 68, se debe dejar todo por defecto, pues inventor detecta automáticamente las superficies horizontales de la pieza sobre las cuales realizará el acabado.

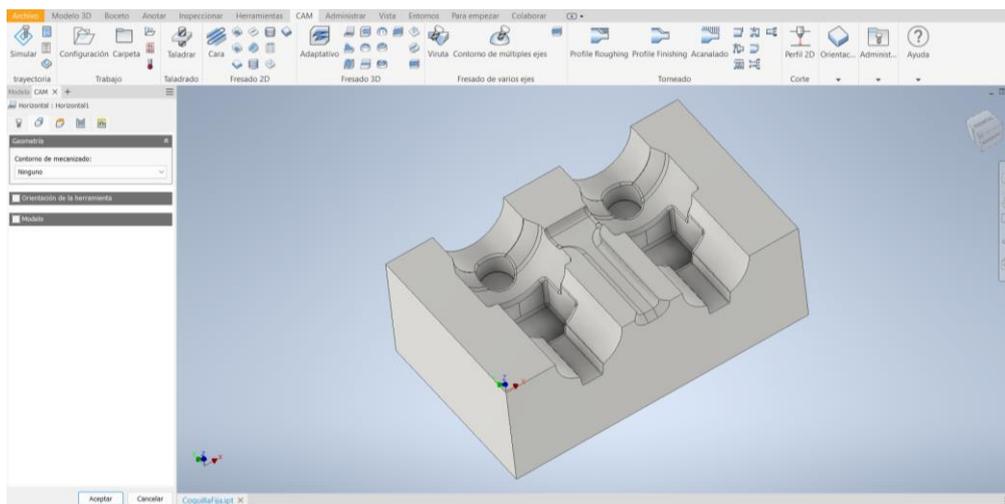


Figura 68: Pestaña “geometría” en estrategia de acabado horizontal

En la pestaña “Alturas” es importante definir la altura superior en la parte superior del modelo, es decir del molde final, y establecer un desfase superior de -1 mm para evitar que esta operación realice el acabado sobre la cara superior del molde, la cual ya fue acabada con el planeado inicial. En la Altura inferior se selecciona la parte inferior del modelo.

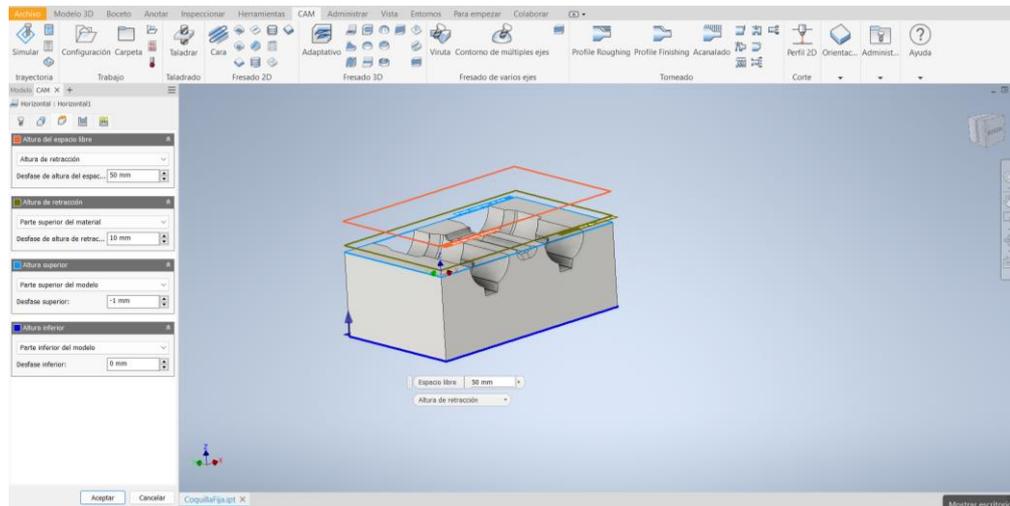


Figura 69: Pestaña “alturas” en estrategia de acabado horizontal

La Figura 70 muestra la pestaña “pasadas” donde se define una sobrepasada máxima de 2 mm y mínima de 0.2 mm y hay que verificar que la pestaña “material a dejar” esté deshabilitada pues es una operación de acabado. También se activará la casilla “pasadas de desfase axial” para establecer un total de dos pasadas y una reducción máxima de 0.5 mm para el acabado de las superficies horizontales de la cavidad del molde.

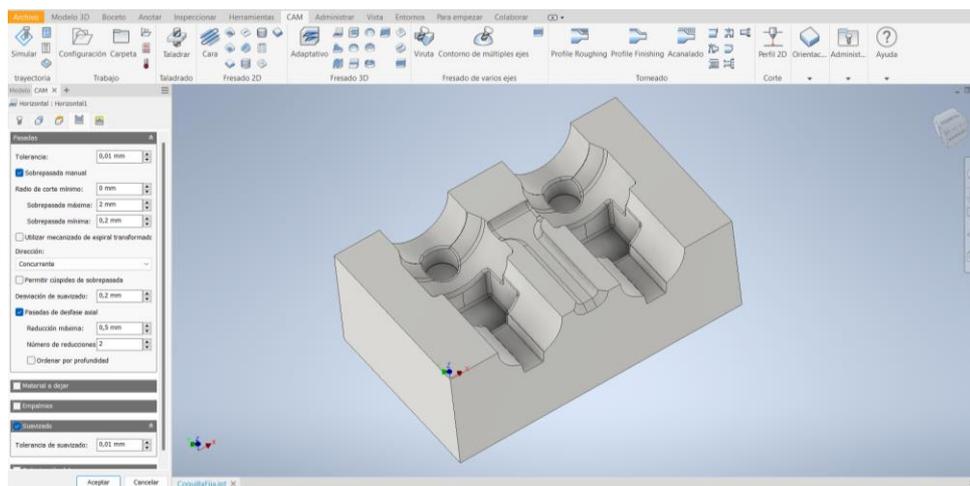


Figura 70: Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado horizontal

Por último, en la pestaña “vinculación” se elige retracción total para no tener problemas de colisiones durante los movimientos de la herramienta, y retracción rápida y en tipo de rampa, por penetración.

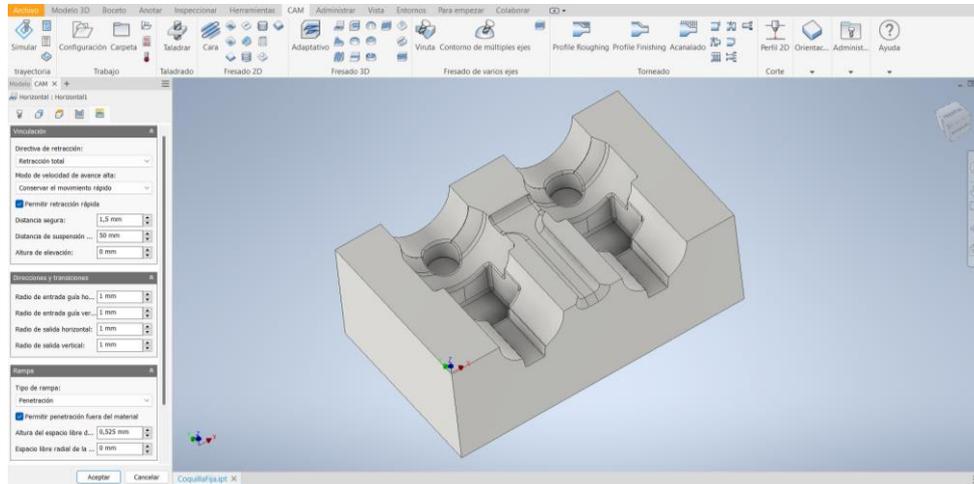


Figura 71: Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado horizontal

En la Figura 72 se muestran las trayectorias seguidas por la herramienta en esta operación. Se observa como realiza el acabado solo de las superficies horizontales de la cavidad del molde, excluyendo la zonas horizontales de la cara superior de la pieza, que fueron mecanizadas con la primera operación de planeado.

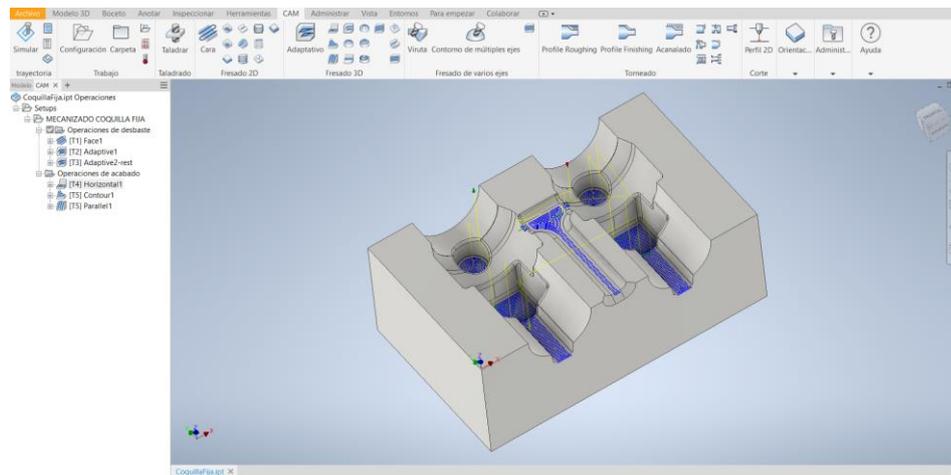


Figura 72: Trayectorias de la estrategia de acabado horizontal

En la Figura 73 se muestra la simulación del mecanizado del molde hasta ésta última operación. Los distintos colores diferencian las distintas operaciones de mecanizado realizadas.

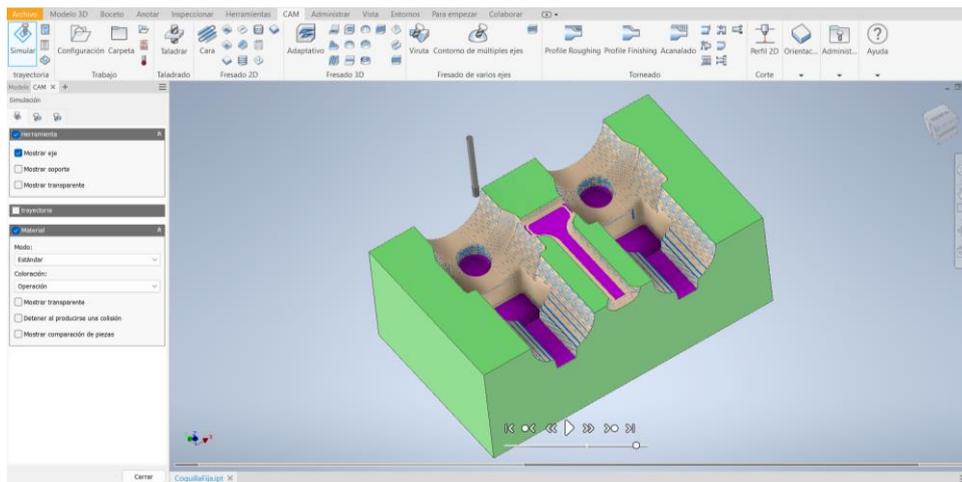


Figura 73 : Simulación mecanizado del molde hasta operación de acabado Horizontal

En este caso, observamos en color morado ésta operación de acabado Horizontal.

El tiempo de mecanizado de esta operación es de 22 minutos.

A continuación se realiza la primera operación para el acabado de las paredes: **contorno**.

Para esta operación se va a emplear una fresa de punta esférica de 10 mm de diámetro. Como siempre, a la hora de elegir la herramienta hay que tener en cuenta que la longitud de la herramienta sea lo suficientemente grande para evitar colisiones con las paredes de la pieza durante el mecanizado. Para las operaciones de acabado se suelen utilizar este tipo de fresas de punta esférica, pues proporcionan un gran acabado superficial.

La fresa elegida es la R216.42-10030-AQ15G. La velocidad de corte recomendada por el fabricante es para esta operación es de 282 mm/min y un avance por diente de 0,144 mm. Esta herramienta se muestra en la Figura 74.

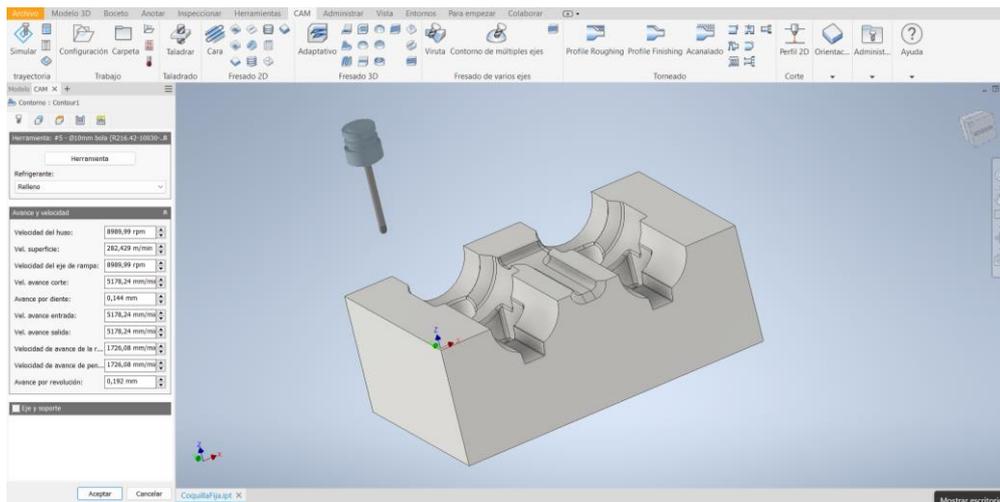


Figura 74 : Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado “contorno”

Una vez elegida la herramienta, en la pestaña “geometría”, se selecciona la geometría necesaria para configurar correctamente la operación. En contorno de mecanizado se selecciona “silueta” con el centro de la herramienta en el contorno. Además se debe activar la casilla “inclinación”. En ella se va a establecer que esta operación realice el mecanizado de las superficies con una inclinación entre 30° y 90°. Podemos observar estos cambios en la Figura 75.

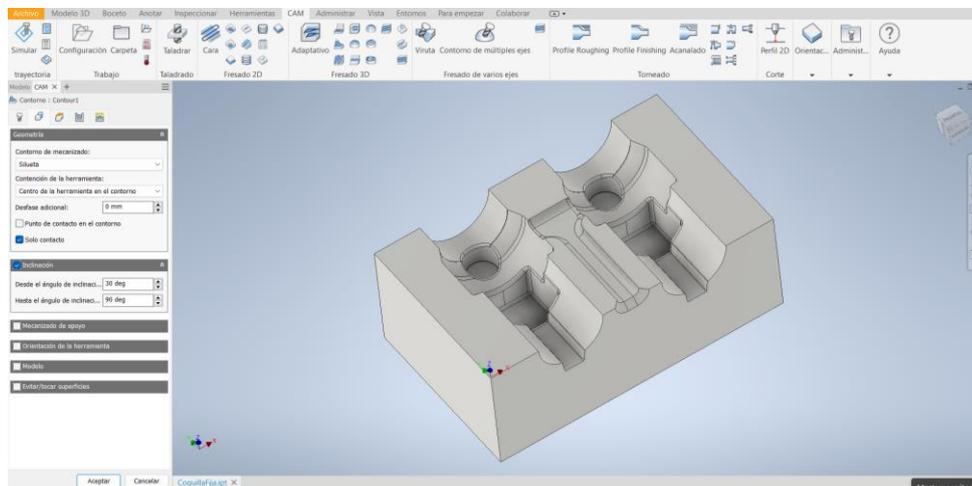


Figura 75 : Pestaña “geometría” en estrategia de acabado “contorno”

En la pestaña “Alturas”, se definen de nuevo las distancias del mecanizado. Hay que asegurarse que la altura superior esté en la parte superior del modelo y la inferior en la parte inferior del modelo para mecanizar la cavidad del molde.

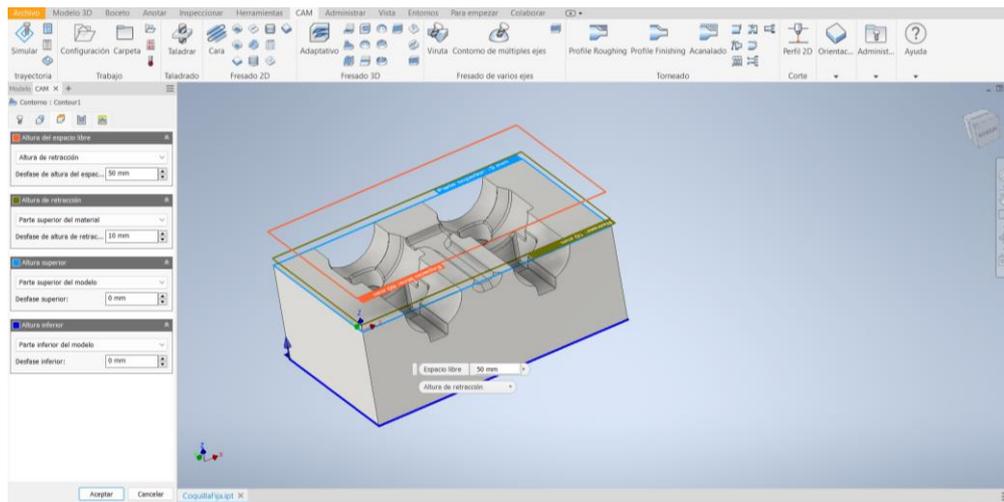


Figura 76 : Pestaña “alturas” en estrategia de acabado “contorno”

En la Figura 77 se observan los parámetros de la pestaña “pasadas”. Se define una reducción máxima de 0.1 mm para esta operación de acabado, se activa la casilla “ordenar por islas” y también la casilla “suavizado”.

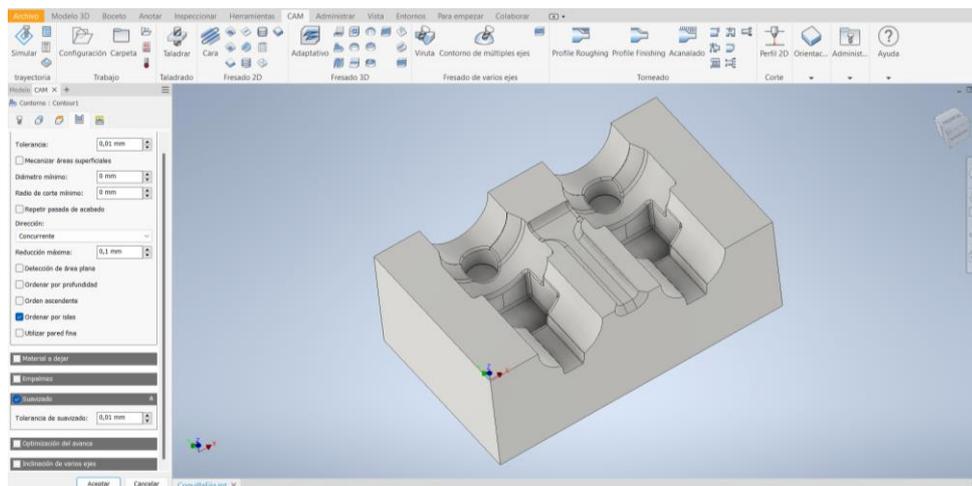


Figura 77 : Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado “contorno”

Por último en la pestaña “vinculación” se elige retracción total para evitar colisiones de la herramienta al mecanizar, permitir retracción máxima y en tipo de rampa se elige “hélice”.

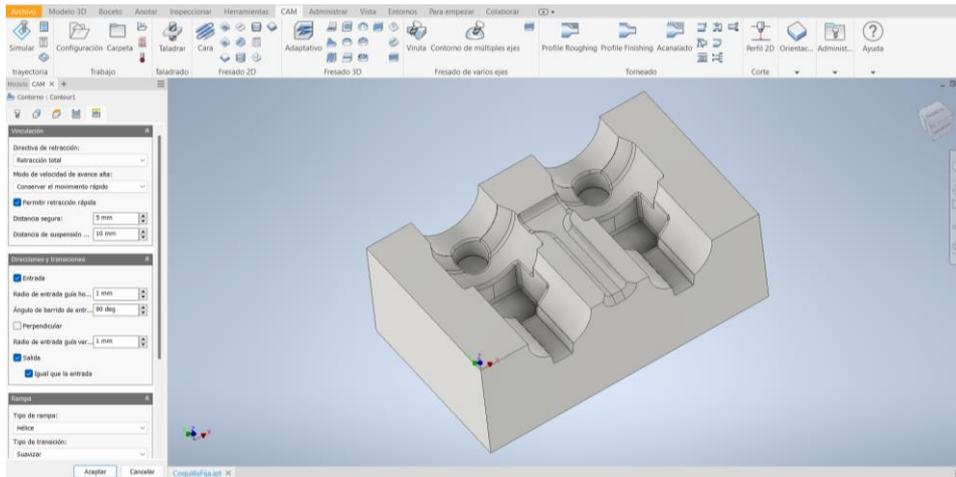


Figura 78 : Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado “contorno”

En la Figura 79 se pueden ver las trayectorias de esta operación. En azul se muestran las trayectorias de corte, en verde las entradas de la herramienta y en amarillo los movimientos entre cortes.

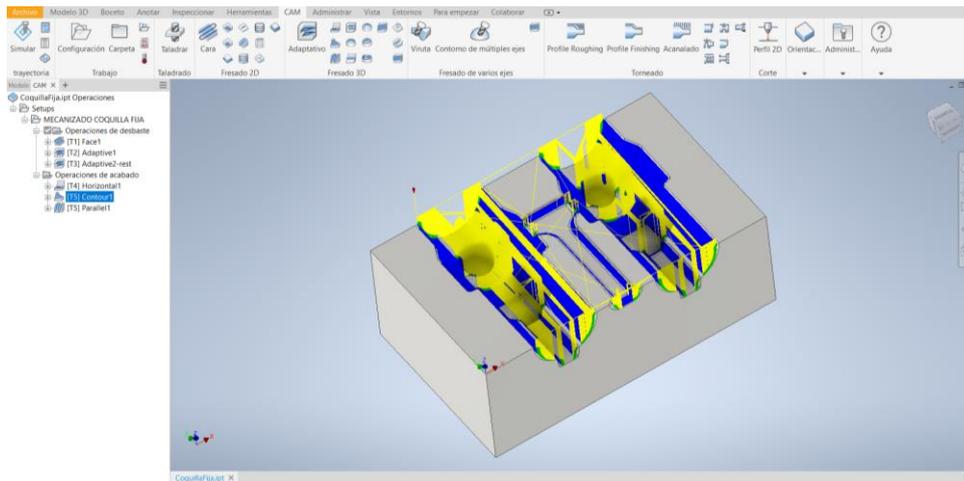


Figura 79 : Simulación mecanizado molde hasta operación de acabado “contorno”

El tiempo de mecanizado en esta operación es de 14 horas y 20 minutos.

Finalmente, en la Figura 80, se muestra la simulación final del mecanizado hasta esta última operación de contorno, la cual se observa de color amarillo.

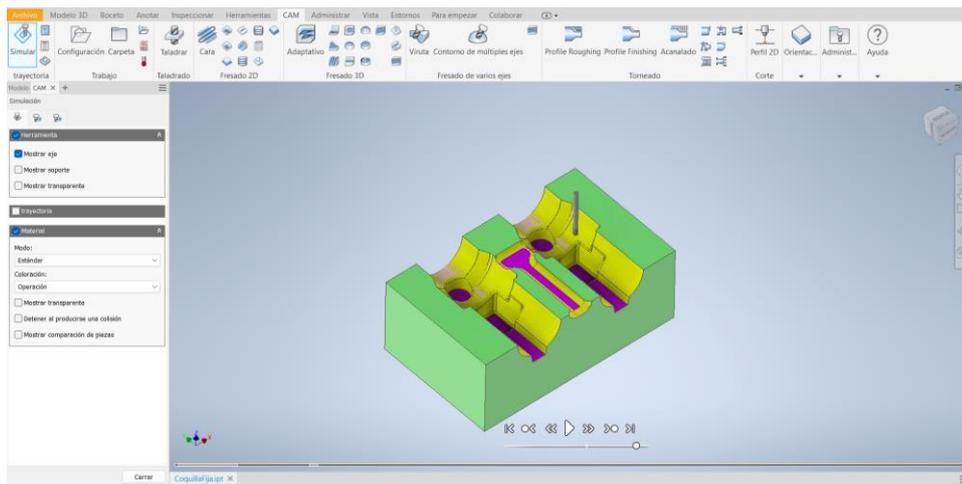


Figura 80 : Simulación mecanizado molde hasta operación de acabado “contorno”

Por último, para completar el mecanizado del molde con Inventor, se va a realizar la estrategia “**paralelo**” para el acabado de las superficies con un ángulo comprendido entre 0 y 35 grados.

La herramienta a utilizar será la misma que en la operación anterior, es decir una fresa esférica enteriza de 10 mm de diámetro de corte y con una longitud suficiente para que no se produzcan colisiones con la pieza de trabajo. La velocidad de corte recomendada será también de 282 m/min y el avance por diente de 0,144 mm. En la Figura 81 se muestra la herramienta seleccionada.

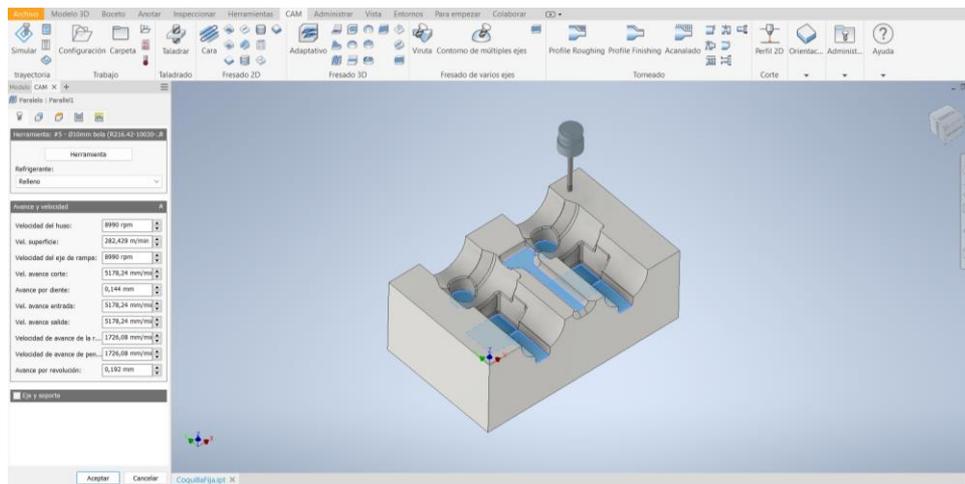


Figura 81 : Pestaña “herramienta” en estrategia de acabado “paralelo”

Después de elegir la herramienta se configura la pestaña “geometría”. Hay que activar la pestaña “inclinación” y en esta ocasión seleccionar el rango de ángulos que faltan de mecanizar después de la operación anterior. Se seleccionará un rango de 0 a 35 grados por lo que se producirá un solape de 5

grados con la operación anterior y de esta forma se asegurará el mecanizado de toda la superficie. En mecanizado de apoyo se selecciona “desde operaciones anteriores”. Se activa también la casilla “evitar/tocar superficies” y se seleccionan las superficies horizontales de la cavidad del molde que ya fueron mecanizadas para que sean excluidas de las trayectorias de esta operación.

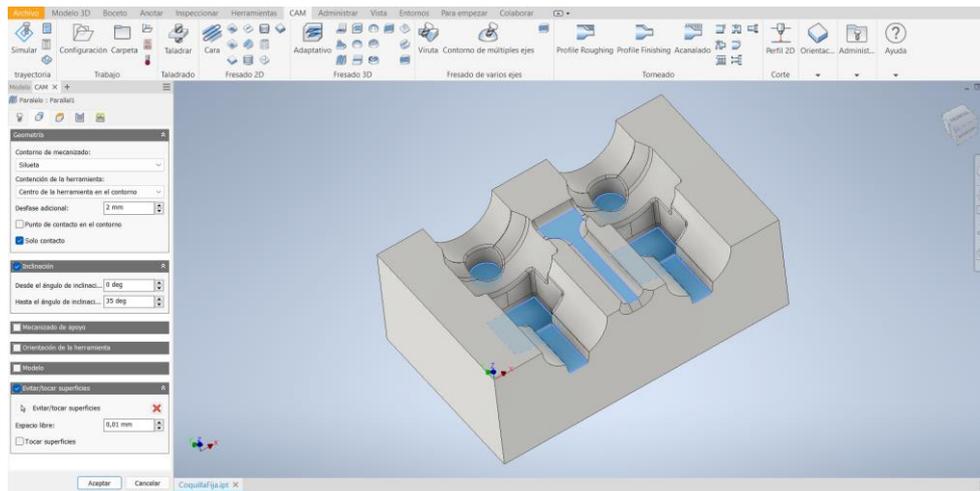


Figura 82 : Pestaña “geometría” en estrategia de acabado “paralelo”

En la pestaña “Alturas” se volverán a definir las distancias de mecanizado, estableciendo un desfase en la altura superior respecto a la parte superior del modelo de -1 mm. Esto es para evitar que esta operación mecanice la cara superior del molde que ya fue realizada mediante un planeado en la primera operación.

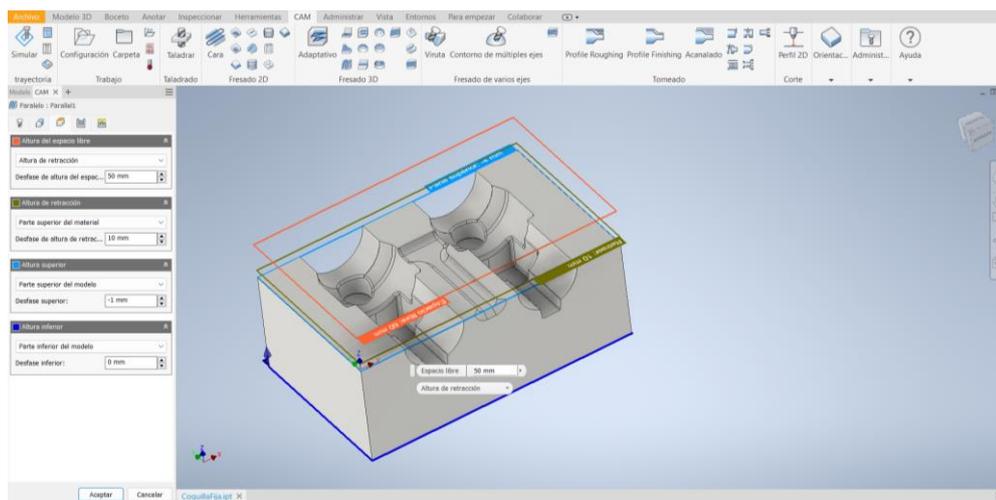


Figura 83 : Pestaña “alturas” en estrategia de acabado “paralelo”

En la Figura 84, se pueden ver los parámetros definidos en la pestaña “pasadas”, donde se ha definido una sobrepasada de 0.1 mm, pasadas de desfase axial con una reducción máxima de 0.1 mm y se ha activado las casilla de “suavizado”. Se define una dirección de pasada de 90 grados para que la trayectoria de los cortes sea más continua.

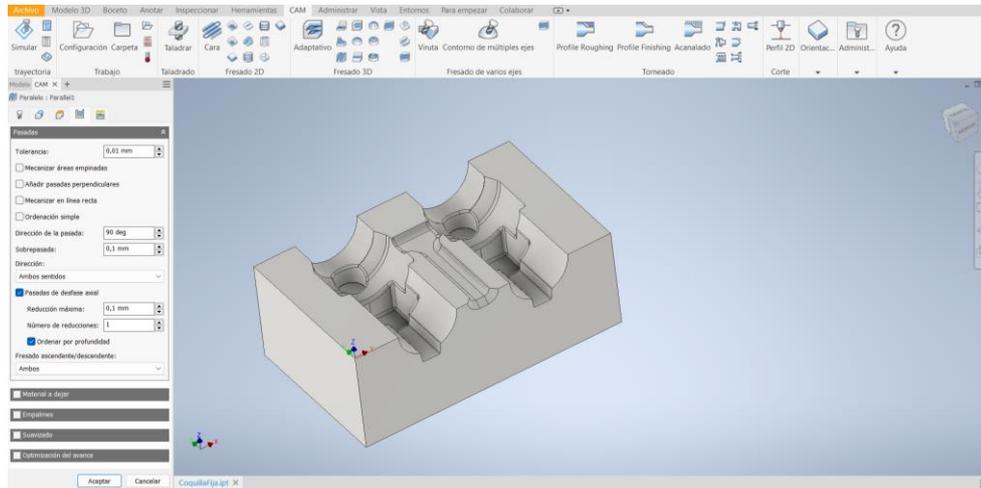


Figura 84 : Pestaña “pasadas” en estrategia de acabado “paralelo”

La Figura 85 muestra la pestaña “vinculación” en la cual elegimos retracción total. Hacemos click en aceptar para completar la operación.

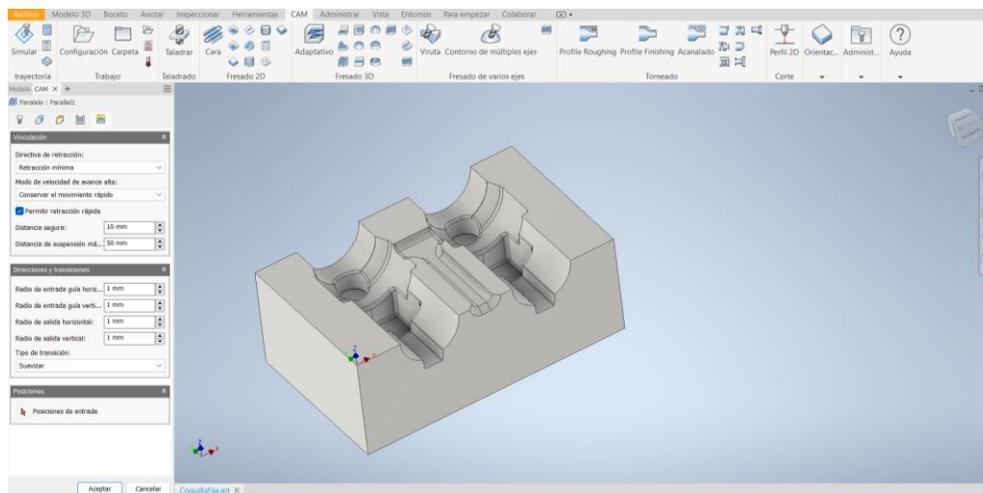


Figura 85 : Pestaña “vinculación” en estrategia de acabado “paralelo”

Al hacer click sobre la operación “paralelo” creada se puede observar las trayectorias seguidas por la herramienta en dicha operación, como muestra la Figura 86. En azul se observan las trayectorias de corte. El tiempo de mecanizado de esta operación es de 1 hora y 7 minutos.

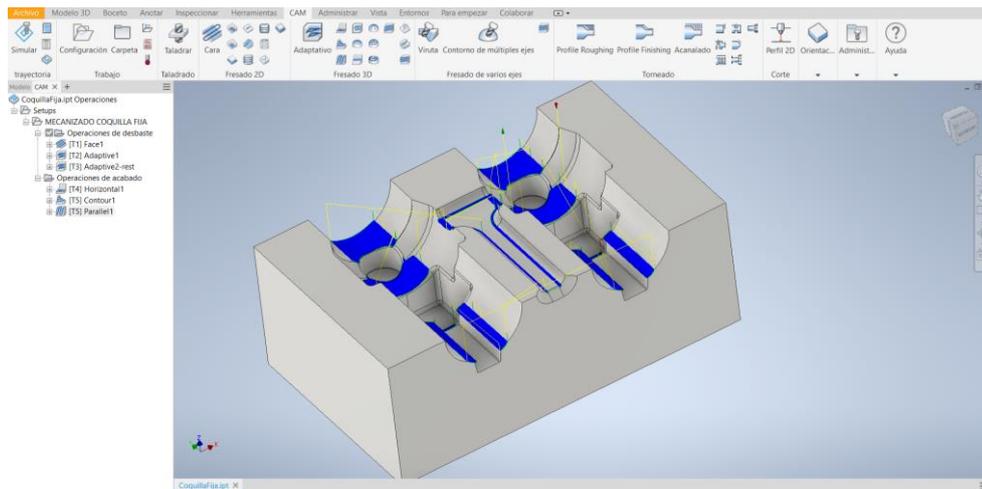


Figura 86 : Trayectorias estrategia de acabado “paralelo”

Esta operación de acabado era la última del mecanizado del molde, por lo que se va a simular todo el proceso para verificar el resultado final del mecanizado.

En la Figura 87 se muestra el resultado final del mecanizado de la coquilla fija llevado a cabo en este trabajo de fin de grado. Los distintos colores definen las distintas operaciones empleadas para ello.

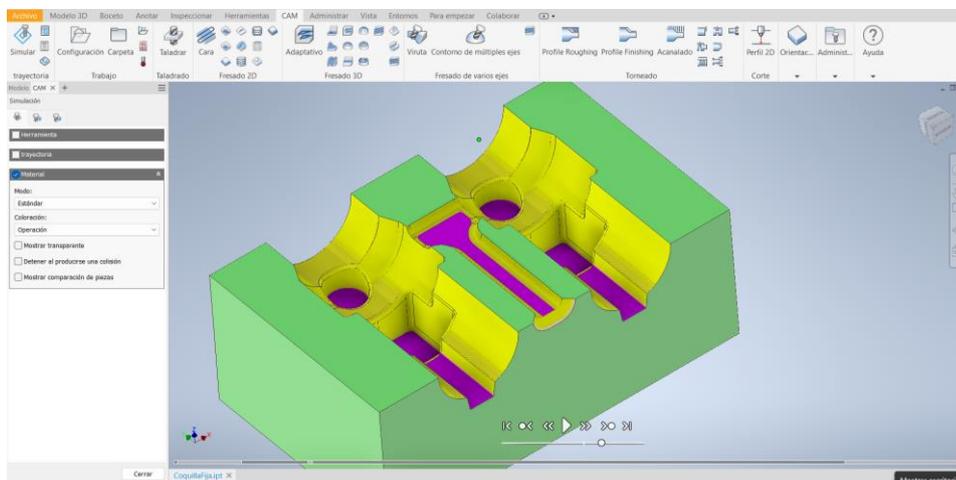


Figura 87 : Simulación mecanizado del molde hasta operación de acabado “paralelo”

A continuación, en la Figura 88, se muestran dos imágenes con el resultado final de la simulación de los mecanizados de la coquilla fija y la móvil. El mecanizado de la coquilla móvil no se explicará en el presente trabajo ya que es similar al de la coquilla fija. Se utilizan las mismas herramientas y operaciones ya que las geometrías de ambas coquillas son muy parecidas.

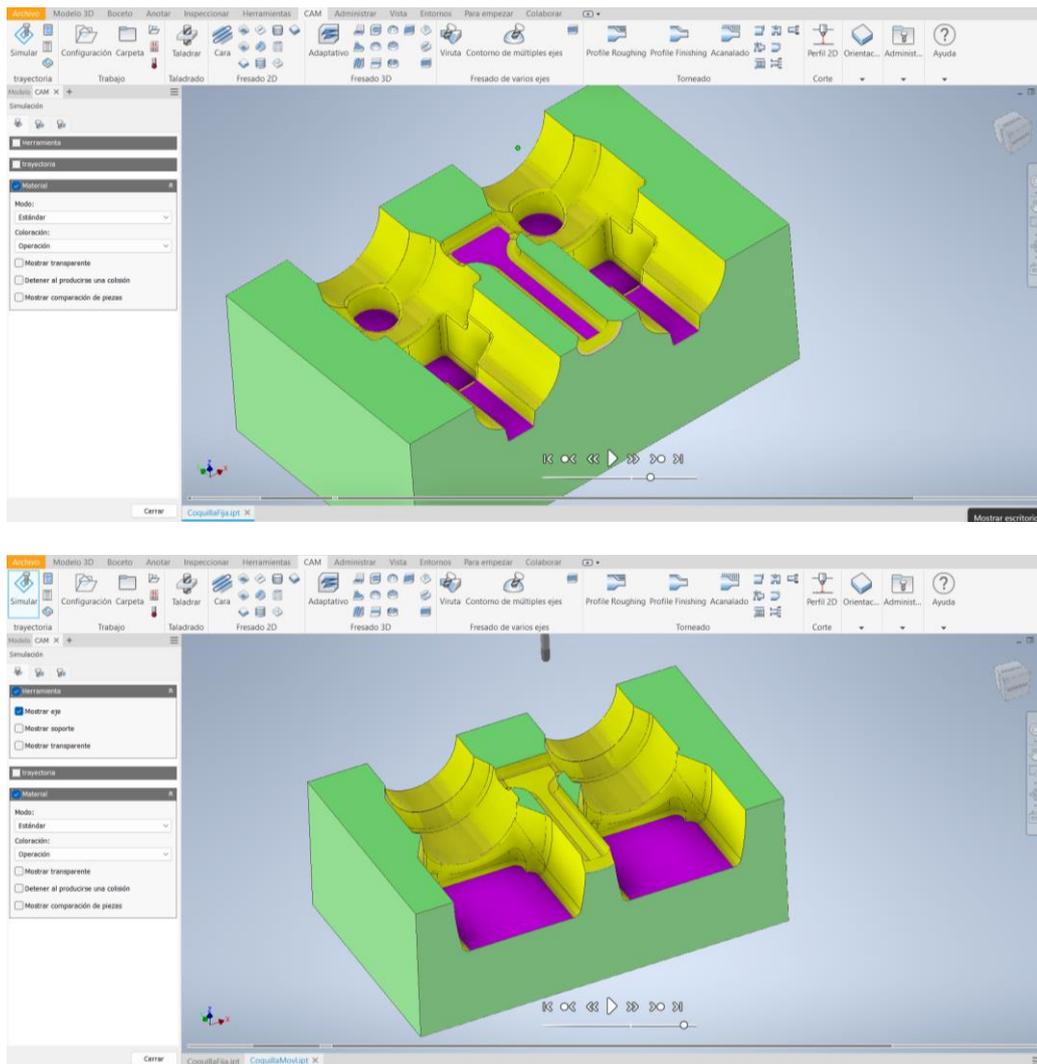


Figura 88 : Resultado final simulación coquillas fija y móvil

Las zonas grises que se ven en algunas zonas en las anteriores imágenes de la simulación de las coquillas son debidas a la precisión de la simulación que tiene Inventor CAM. No es ningún error de mecanizado pues inventor, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, indica cuando se producen colisiones que afectan a nuestro mecanizado final.

Como se puede observar, no se ha realizado el mecanizado de acabado de los bordes del molde, el cual se podría haber hecho en Inventor CAM mediante estrategias como “Lápiz”. Esto se debe a que este tipo de moldes, una vez mecanizados, se ven sometidos a un proceso de electroerosión mediante el cual se realiza el acabado final del molde, eliminando el material sobrante y obteniendo el acabado de los bordes del mismo con mayor precisión.

El último paso es el postprocesado, es decir la obtención del código de control numérico que se enviará al centro de mecanizado para obtener la pieza que queríamos mecanizar.

Para ello, dentro del módulo “Trayectorias” en la pestaña CAM , seleccionamos el icono  para ejecutar el postprocesado. Aparece la pantalla mostrada en la Figura 89:

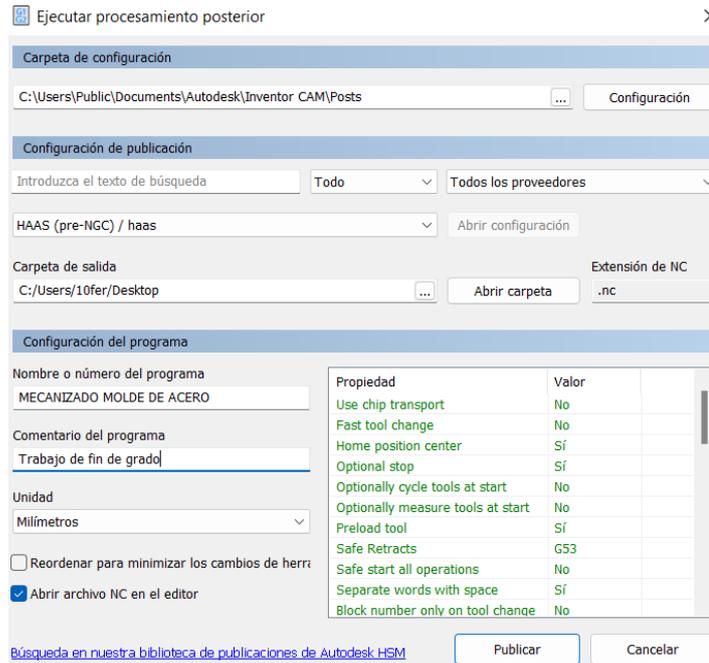


Figura 89 : Ventana postprocesado para obtención del código de control numérico

En la cual, se elige el postprocesador a utilizar para obtener el código, en nuestro caso usaremos HAAS (pre-NGC)/ haas. Se elige el nombre que llevará el programa de mecanizado, la carpeta de salida donde se va a guardar y se selecciona “publicar”. Se abrirá el código en el editor de código por si es necesario editarlo antes de enviarlo a la máquina.

La extensión de estos códigos es muy grande por lo que no se mostrará en este trabajo el código obtenido.

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones y líneas de trabajo futuras

El proceso de trabajo ha sido, inicialmente, un estudio sobre la evolución e importancia de los sistemas CAD/CAM en la actualidad. Se ha podido conocer la revolución que supuso la implantación de esta tecnología en los procesos de fabricación, mejorando el flujo de trabajo para el desarrollo de productos, reduciendo tiempos de mecanizado y posibles errores en los mismos, de manera que se ha logrado una gran optimización del proceso aumentando la productividad de las empresas y reduciendo costes.

Después se ha realizado un introducción al proceso de fundición de metales en molde permanente o coquilla. La fundición de metales es uno de los procesos de fabricación más antiguos. Se ha podido conocer un poco más sobre este tipo de proceso de fabricación, su utilidad y las aplicaciones que tiene.

Por último y, finalidad del trabajo de fin de grado, se ha demostrado que el software Inventor CAM está perfectamente capacitado para el mecanizado de moldes de acero empleados en la fundición de metales. Se ha mostrado la utilidad de este programa para realizar este tipo de mecanizados, empleando estrategias de fresado en 3 ejes de manera que pueda ser un software a tener en cuenta en un futuro por las empresas destinadas a este tipo de mecanizados, ampliando la visión más allá de los softwares más conocidos en la industria y empleados para este tipo de trabajos.

Además, se ha podido comprobar la utilidad de este software para la enseñanza en la universidad de la tecnología CAD/CAM, abordando todos los conceptos del plan de estudios sobre este ámbito. Este software está disponible en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid y en un futuro formará parte del plan de estudios.

Por último, y como líneas de trabajos futuras, se podría comprobar las capacidades y limitaciones de este software en otros procesos de fabricación desarrollados en las industrias, tales como mecanizados en 5 ejes, torneado, corte por láser, chorro de agua o plasma. También se podría realizar un mecanizado con Inventor que englobara todo el proceso de fabricación completo, desde el diseño a través del entorno CAD hasta la fabricación en su entorno CAM, comprobando la capacidad del programa en el desarrollo completo de un producto a través de su tecnología CAD/CAM integrada.



6.2 Conclusiones personales

En el apartado personal, este trabajo me ha servido para aprender el funcionamiento y ver la utilidad de un software que desconocía y con el que no había trabajado antes, permitiéndome ampliar la mira más allá de aquellos softwares más conocidos y con los que más he trabajado, viendo que hay otros que son capaces de desempeñar trabajos de mecanizado habituales en las empresas con gran éxito.

Por otro lado, me ha servido para ser consciente y fomentar mi interés sobre la importancia de la tecnología CAD/CAM en los procesos de fabricación en la actualidad y la necesidad de dominar los conocimientos de la misma.

El dominio de este tipo de softwares, hoy en día, es fundamental para acceder al mercado laboral en este tipo de industrias.



7. Bibliografía

7.1 Libros consultados

ASCENT. (2021). *Autodesk Inventor CAM 2022- milling fundamentals*. Charlottesville: ASCENT-Center for technical knowledge. Consultado en abril.

ISBN: 978-1956032321

Bi, Z., & Wang, X. (2020). *Computer Aided Design and Manufacturing*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd and ASME press. Consultado en abril.

ISBN: 978-1119667889

Kumar Choudhary, D., & Jadoun, D. (2021). *Computer Integrated Manufacturing & Computer Aided Design*. Little Rock: Walnut Publication. Consultado en abril.

ISBN: 978-9391145279

Nageswara Rao, P. (2010). *CAD/CAM Principles and Applications*. New Delhi: McGraw Hill Education. Consultado en abril.

ISBN: 978-0070681934

SARCAR, M., MALLIKARHUNA RAO, K., & LALIT NARAY, K. (2008). *Computer Aided Design and Manufacturing*. New delhi: Prentice-Hall of India Private Limited. Consultado en abril.

ISBN: 978-8120333420

7.2 Páginas web consultadas

3.1.3.- *Moldes permanentes. Coquillas. | DMMF04.- Materiales para la fabricación de moldes y modelos de fundición.* (s.f.). Consultada el 3 de abril de 2022, desde:

https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/DFM/DMMF/DMMF04/es_DFM_DM MF04_Contenidos/website_313_moldes_permanentes_coquillas.html

Acero H13 | AISI H13 | 1,2344 | SKD61. (s.f.). Consultada el 11 de abril de 2022 desde: <https://waldunsteel.com/es/products/acero-h13/>

Dodok, T., Čuboňová, N., Císar, M., Kuric, I., & Zajačko, I. (2017). Utilization of Strategies to Generate and Optimize Machining Sequences in CAD/CAM. *Procedia Engineering*, 192, 113–118. Consultada el 22 de abril de 2022 desde: <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.06.020>

El proceso de fundición | ESingeneria.pro. (s.f.). Consultada el 5 de abril de 2022 desde: <https://esingeneria.pro/el-procesos-de-fundicion/>

Fundición en molde metálico - Fundalco. (s.f.). Consultada el 4 de abril de 2022 desde: <https://www.fundalco.com/process/fundicion-en-molde-metalico/>

Moldeo por Gravedad - Proceso y Aplicaciones - Gestión De Compras. (s.f.). Consultada el 4 de abril de 2022 desde: <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/fundicion/moldeo-por-gravedad/>

PROCESOS DE FUNDICION DE METALES: Fundición en molde permanente. (s.f.). Consultada el 11 de abril de 2022 desde:

<https://fundicionmetal-carp.blogspot.com/2017/02/fundicion-en-molde-permanente.html>

Qué es el acero H13 / 1.2344 / SKD61 • Composición química • Precio. (s.f.). Consultada el 3 de abril de 2022 desde: <https://es.steelpurchase.com/h13-12344-sk61-acero/>

The History - and Future - of CAD/CAM Technology. (s.f.). Consultada el 27 de abril de 2022 desde: <https://www.thomasnet.com/insights/the-history-and-future-of-cad-cam-technology/>



Tipos de fundición de metales | Proceso y aplicación de fundición de metales.
(s.f.). Consultada el 11 de abril de 2022 desde:
<https://dawangcasting.com/es/blog/types-of-metal-casting/>

Todo lo que necesita saber sobre el acero para herramientas H13 / DEK. (s.f.).
Consultada el 7 de abril de 2022 desde:
<https://www.dekmake.com/es/todo-lo-que-necesita-saber-sobre-el-acero-para-herramientas-h13/>



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

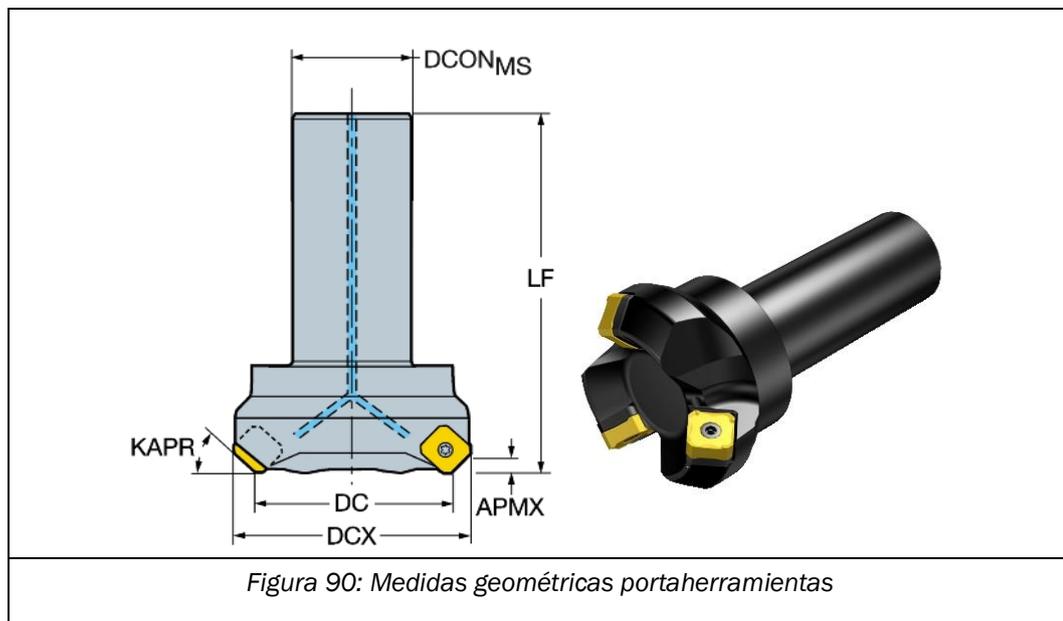
Anexos

Anexo I. Herramientas de corte

En esta sección se muestran las herramientas utilizadas para el mecanizado del molde de acero. La selección de las mismas ha sido realizada en sandvik toolguide, plataforma que nos recomienda las herramientas más adecuadas según las características de cada operación de nuestro mecanizado. Cabe destacar que las herramientas seleccionadas son las mismas para cada parte del molde, es decir tanto para la coquilla fija como la móvil.

Herramientas planeado

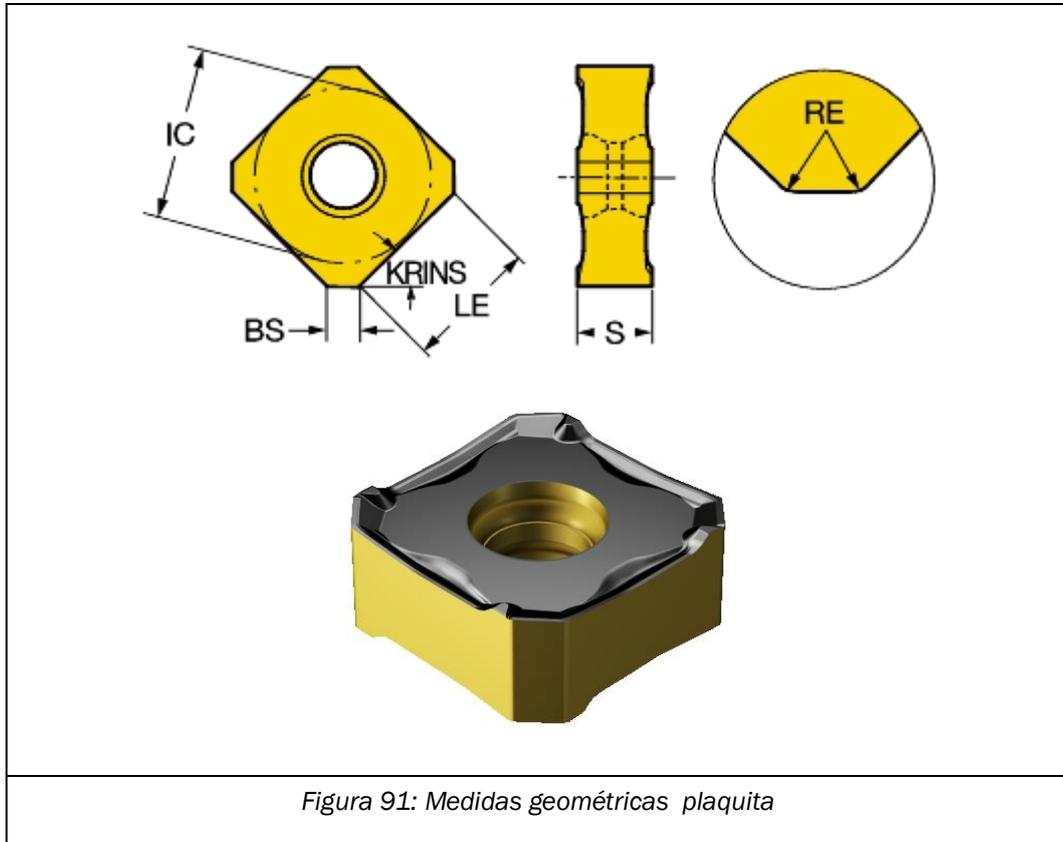
- Portaherramientas





Código iso	345-050A32-13M
Ángulo del filo de herramienta (KAPR)	45°
Diámetro de corte (DC)	50 mm
Diámetro máximo de corte (DCX)	54,08 mm
Profundidad de corte máxima (APMXFFW)	6 mm
Ángulo máximo de progresión en rampa (RMPX)	0°
Número de filos efectivo periférico (ZEFP)	4
Mano (HAND)	R
Presión de refrigerante (CP)	10 bar
Diámetro de conexión (DCON)	32 mm
Longitud funcional (LF)	120 mm
Longitud del cuerpo (LB)	40 mm
Ángulo de desprendimiento radial (GAMF)	6,33°
Ángulo de desprendimiento axial (GAMP)	11,168°
Par (TQ)	3 Nm
Código del material del cuerpo (BMC)	Acero
Peso del elemento (WT)	1,011 kg
Precio	521 €

- Plaquita



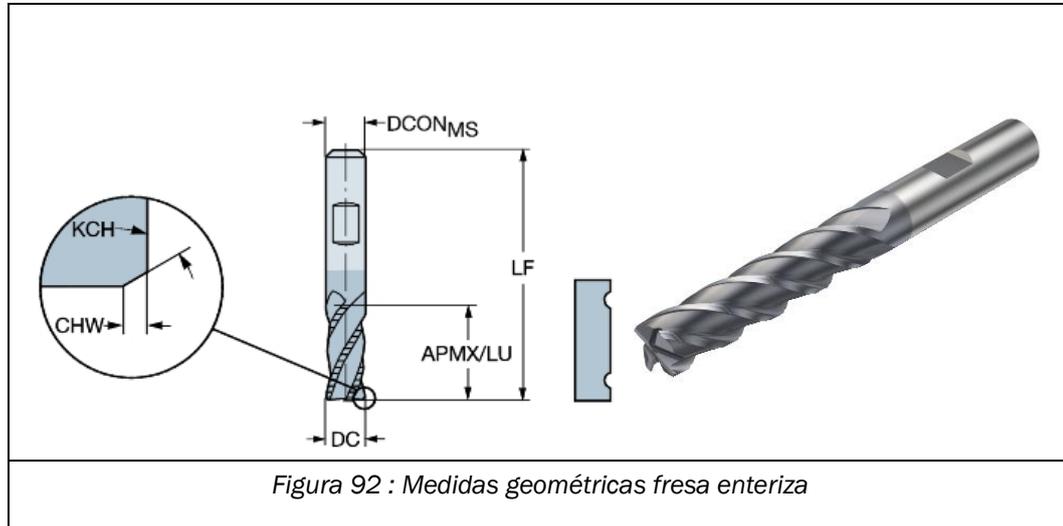
CODIGO ISO	345R-1305M-PH 4330
Clasificación de material, nivel 1 (TMC1ISO)	
Fijación del diámetro del agujero (D1)	4,8 mm
Número de filos (CEDC)	8
Diámetro de círculo inscrito (IC)	13 mm
Código de forma de plaquita (SC)	S
Longitud efectiva del filo (LE)	8,8 mm
Profundidad de corte máxima (APMX)	6 mm
Longitud filo Wiper (BS)	2 mm
Radio filo Wiper (BSR)	107 mm
Radio de punta (RE)	0,8 mm



Ángulo de filo principal (KRINS)	45°
Ángulo de desprendimiento de plaquita (GAN)	19°
Mano (HAND)	R
Calidad (GRADE)	4330
Sustrato (SUBSTRATE)	HC
Grosor de plaquita (S)	5,05 mm
Peso del elemento (WT)	0,009 kg
Precio	18 €

Herramientas desbaste adaptativo inicial

- Fresa enteriza



CODIGO ISO	2P370-2000-PB 1740
Clasificación de material, nivel 1 (TMC1ISO)	
Diámetro de corte (DC)	20 mm
Contacto frontal de diámetro de corte (DCF)	19,5 mm
Chaflán en el vértice (KCH)	45°
Anchura de chaflán en el vértice (CHW)	0,25 mm
Profundidad de corte máxima (APMX)	80 mm
Longitud utilizable (LU)	80 mm
Número de filos efectivo periférico (ZEFP)	4
Ángulo máximo de progresión en rampa (RMPXFFW)	4°
Tolerancia de diámetro de conexión (TCDCON)	h6
Calidad (GRADE)	1740
Sustrato (SUBSTRATE)	HC
Diámetro de conexión (DCON)	20 mm
Longitud funcional (LF)	145 mm



Ángulo de hélice de desahogo (FHA)	37°
Ángulo de desprendimiento radial (GAMF)	10°
Ángulo de desprendimiento axial (GAMP)	7,5°
Peso del elemento (WT)	0,548 Kg
Precio	509 €

Herramientas desbaste adaptativo restante y acabado superficies horizontales

- Adaptador fresa

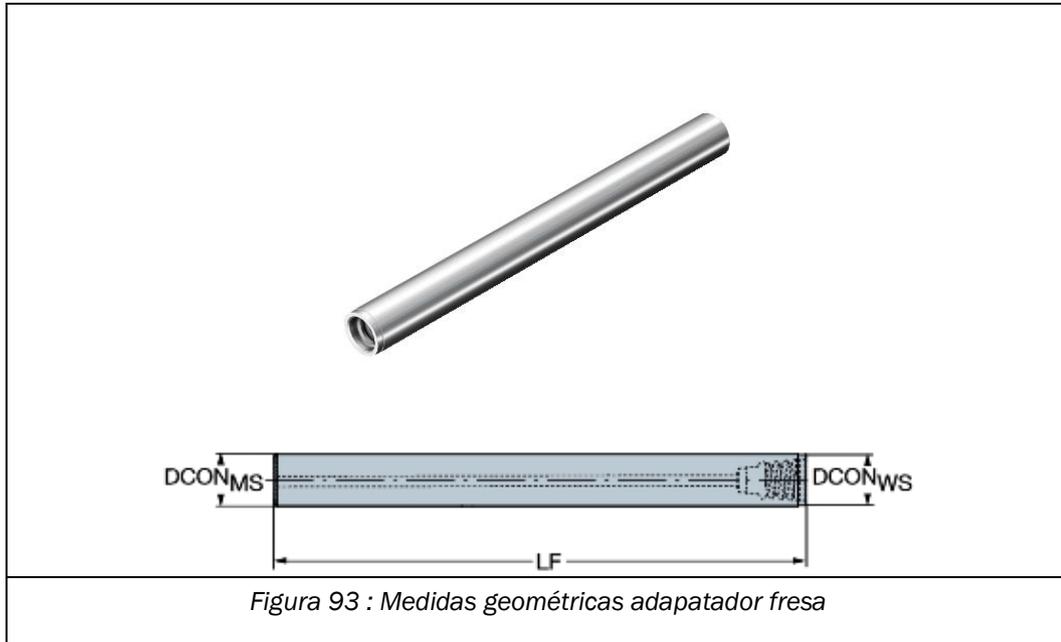


Figura 93 : Medidas geométricas adaptador fresa

CODIGO ISO	AEH10-A09.2-SH-120
Presión de refrigerante (CP)	80 bar
Diámetro de conexión (DCON)	9,15 9,2 mm
Longitud funcional (LF)	120 mm
Diámetro del cuerpo (BD1)	9,2 mm
Longitud funcional (LF)	120 mm
Ángulo de semi-cono del cuerpo (BHTA1)	0°
Par (TQ)	12 Nm
Código del material del cuerpo (BMC)	Heavy metal
Peso del elemento (WT)	0,185 kg
Precio	537 €

- Fresa

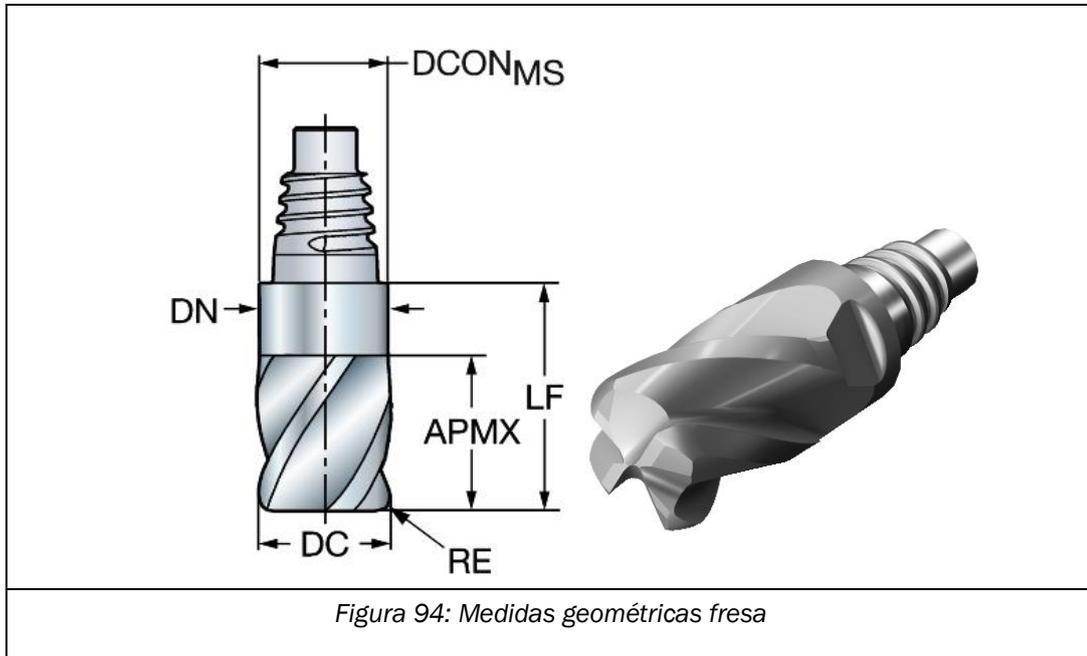


Figura 94: Medidas geométricas fresa

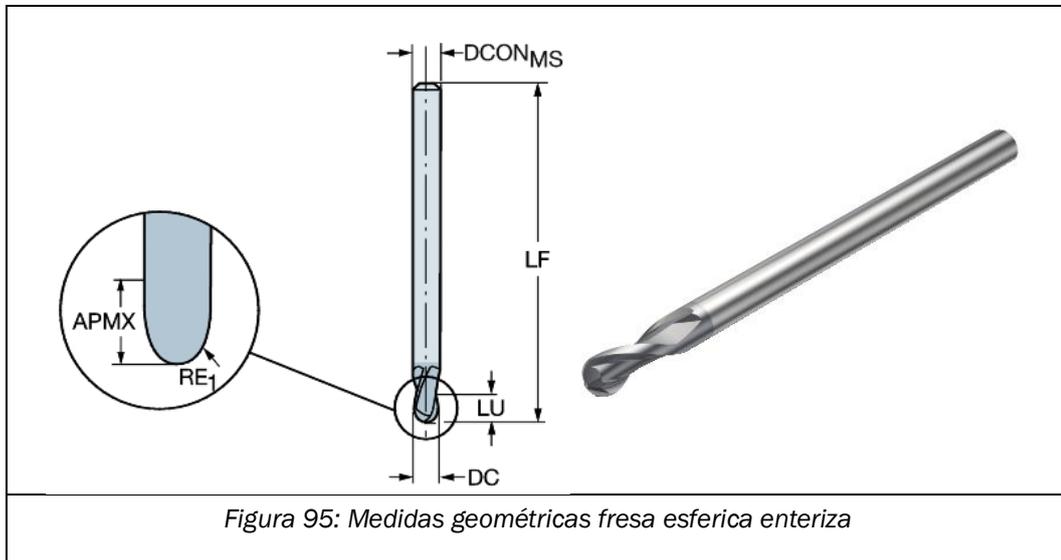
CODIGO ISO	316-10SL442-10005P 1730
Clasificación de material, nivel 1 (TMC1ISO)	
Diámetro de corte (DC)	10 mm
Contacto frontal de diámetro de corte (DCF)	9 mm
Radio de punta (RE)	0,5 mm
Profundidad de corte máxima (APMX)	12 mm
Capacidad de corte central (CCC)	true
Número de filos efectivo periférico (ZEFP)	4
Ángulo máximo de progresión en rampa (RMPXFFW)	5°
Calidad (GRADE)	1730
Sustrato (SUBSTRATE)	HC
Diámetro de conexión (DCON)	9,7 mm
Diámetro funcional (DFC)	7,17 mm



Longitud funcional (LF)	18,5 mm
Diámetro del cuello (DN)	9,7 mm
Ángulo de hélice de desahogo (FHA)	42°
Ángulo de desprendimiento radial (GAMF)	10,5°
Ángulo de desprendimiento axial (GAMP)	10,5°
Peso del elemento (WT)	0,031 kg
Precio	84 €

Herramientas de acabado. Estrategias contorno y paralelo.

- Fresa esférica enteriza



CODIGO ISO	R216.42-10030-AQ15G
Clasificación de material, nivel 1 (TMC1ISO)	PMKSH
Diámetro de corte (DC)	10 mm
Radio de punta (RE1)	5 mm
Longitud utilizable (LU)	15 mm
Número de filos efectivo periférico (ZEFP)	2
Profundidad de corte máxima (APMXPFW)	15 mm
Calidad (GRADE)	P10
Sustrato (SUBSTRATE)	HC
Ángulo máximo de progresión en rampa (RMPXFFW)	15°
Grupo estándar básico (BSG)	COROMANT
Longitud funcional (LF)	150 mm
Diámetro de conexión (DCON)	10 mm
Ángulo de hélice de desahogo (FHA)	30°
Ángulo de desprendimiento radial (GAMF)	-5,5°



Ángulo de desprendimiento axial (GAMP)	1,5°
Rectificaciones máximas (NORGMX)	3
Peso del elemento (WT)	0,177 kg
Precio	241 €